Série A, n°
N° d'ordre :

# THÈSES

PRÉSENTÉES

## A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

**M. E. BESSON,**

Professeur de Physique au Collège de Saint-Dié.

---

**1re THÈSE.** — Contribution a l'étude de la condensation de la vapeur d'eau par détente dans l'air et divers autres gaz.

**2e THÈSE.** — Propositions données par la Faculté.

---

**Soutenues le 27 juin 1913, devant la Commission d'Examen**

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

MM. GUNTZ, *Président.*
GUTTON, ROTHÉ, *Examinateurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1913

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

MM.

| | | |
|---|---|---|
| **Doyen** | FLOQUET, ✻, I. ⏣. | |
| **Assesseur** | PETIT, ✻, I. ⏣, 💣. | |
| **Professeurs honoraires** | HALLER, C ✻, I ⏣. | |
| | BLONDLOT, O ✻, I ⏣. | |
| | CARTAN, ✻, I ⏣. | |
| | BLAISE, I ⏣. | |
| | LE MONNIER, ✻, I ⏣, 💣. | |
| **Chargé de cours honoraire** | MILLOT, I ⏣. | |
| **Professeurs** | FLOQUET, ✻, I ⏣ .. | Analyse. |
| | THOULET, ✻, I ⏣.. | Géologie et Minéralogie. |
| | MOLK, ✻, I ⏣..... | Mécanique rationnelle. |
| | CUÉNOT, I ⏣, O 💣.. | Zoologie. |
| | GUNTZ, ✻, I ⏣..... | Chimie minérale. |
| | VOGT, I ⏣..... | Mathématiques appliquées. |
| | PETIT, ✻, I ⏣, 💣.. | Chimie agricole. |
| | MULLER, I ⏣..... | Chimie physique et électrochimie. |
| | NICKLÈS, ✻, I ⏣... | Géologie. |
| | MINGUIN, I ⏣, 💣... | Chimie. |
| | GUTTON, I ⏣..... | Physique. |
| | ROTHÉ, I ⏣ ..... | Physique. |
| | GRIGNARD, I ⏣✻.. | Chimie organique. |
| | GUYOT, I ⏣....., | Chimie appliquée à la teinture et à l'impression. |
| | WAHL, I ⏣..... | Chimie industrielle. |
| | HUSSON, A ⏣..... | Calcul différentiel et intégral. |
| | GAIN, I ⏣..... | Botanique. |
| **Professeurs adjoints** | BOUIN, I ⏣, 💣..... | Zoologie appliquée. |
| | REBOUL, A ⏣..... | Physique. |
| | MAUDUIT, I ⏣ ..... | Électrotechnique. |
| **Directeurs de Laboratoires** | HAHN, I ⏣ ..... | Laboratoire de Mécanique appliquée. |
| | WENCELIUS, I ⏣... | Laboratoire d'analyses industrielles. |
| **Chargés d'un cours complémentaire** | MARSAL, I ⏣..... | Météorologie. |
| | DUMAS..... | Mécanique appliquée. |
| **Secrétaire** ..... | ROVEL, I ⏣. | |

52323 Paris. — Imp. GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Grands-Augustins.

A

# MES PARENTS.

A

# MONSIEUR ROTHÉ,

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547220_0030

# PREMIÈRE THÈSE.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE

DE LA

# CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU

PAR DÉTENTE DANS L'AIR ET DIVERS AUTRES GAZ.

## INTRODUCTION.

On sait que la condensation de la vapeur d'eau peut être produite par détente. Les expériences de M. C.-T.-R. Wilson (1) ont mis en évidence l'existence d'une limite inférieure du degré de détente nécessaire pour la production du phénomène et d'une limite supérieure au-dessus de laquelle la condensation est très forte et semble se produire sur les propres molécules de la vapeur d'eau ou du gaz auquel elle est mélangée.

Quand le gaz est soumis à l'ionisation préalable des rayons de Röntgen, la condensation est plus importante, mais les limites restent les mêmes.

Enfin, au cours de ces expériences, M. Wilson (2) a signalé une dissymétrie présentée par les ions négatifs et positifs relativement à la condensation de la vapeur d'eau. Les ions négatifs la produisent plus aisément que les ions positifs, et il en est ainsi aussi longtemps qu'on ne

(1) C.-T.-R. Wilson, *Phil. Trans.*, 1897.
(2) *Ibid.*, 1899.

dépasse pas une valeur limite de la détente à partir de laquelle la dissymétrie cesse d'exister.

Dans l'air, cette détente limite est 1,35 (c'est le quotient $\frac{v_2}{v_1}$ du volume du gaz après la détente et du volume de ce même gaz avant la détente) et les détentes extrêmes sont 1,25 et 1,38.

Je ne crois pas que d'autres expériences aient été faites depuis sur ce sujet, soit pour vérifier simplement les résultats de M. Wilson, soit dans le but de modifier la méthode ou d'étendre les recherches à d'autres gaz.

Dans ce travail, commencé en 1908, je me suis proposé de reprendre ces expériences, en particulier celles qui sont relatives à la dissymétrie, et de rechercher s'il ne serait pas possible de substituer à la méthode subjective employée jusqu'ici une méthode photographique qui présenterait l'avantage de conserver l'image des phénomènes observés et d'en permettre une comparaison plus aisée.

Je me suis proposé également d'utiliser cette méthode pour étudier d'autres gaz que l'air, et à l'occasion d'utiliser diverses sources ionisantes : Rayons X et Radium.

Ces expériences m'ont conduit à des résultats nouveaux en même temps que je vérifiais les résultats de mes prédécesseurs.

## CHAPITRE I.

### La condensation par détente.

On sait que lorsqu'on détend brusquement une masse d'air saturée de vapeur d'eau, la détente est accompagnée d'une condensation plus ou moins intense, due à l'abaissement de température résultant de la détente. On peut admettre que celle-ci est adiabatique. La condensation est provoquée par des détentes extrêmement faibles, si

faibles que, pendant longtemps, on a admis que le phénomène était dû uniquement à l'abaissement de la température.

Des expériences aussi nombreuses que variées ont permis de prouver que le refroidissement seul était insuffisant pour provoquer la condensation, et l'on a été conduit à admettre que l'air devait contenir en suspension des centres destinés à amorcer la transformation, ou, comme on dit, à servir de *germes à la condensation.*

L'expérience a prouvé que tous ces centres ne sont pas identiques et n'agissent pas de la même manière. Nous allons d'abord mettre en évidence leur diversité en décrivant l'historique de la condensation.

## Historique.

En 1875, Coulier (1) réussit à montrer l'influence sur la condensation de très fines poussières contenues dans l'air. A cet effet, il utilisait un flacon à trois tubulures

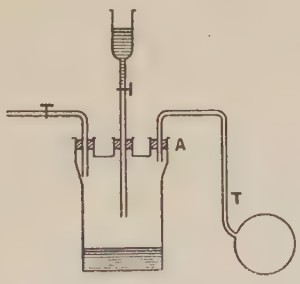


Fig. 1.

contenant un peu d'eau. Par l'une des tubulures A passait un tube T en relation avec une poire en caoutchouc permettant de comprimer l'air par une simple pression de la

(1) Coulier, *Journal de Physique et de Chimie,* t. XXII, 1875, p. 165 à 173 et p. 254.

main. On effectuait la détente en abandonnant la poire à elle-même.

La deuxième tubulure latérale portait un tube à robinet permettant d'expulser l'air du récipient par compression de la poire; dans la tubulure centrale passait un entonnoir à robinet contenant du coton modérément tassé sur lequel on pouvait faire passer de l'air avant de l'introduire dans le flacon.

On effectuait une compression, puis une détente brusque; la flamme d'une bougie observée à travers ce brouillard présentait le phénomène bien connu des couronnes.

Pour réussir cette expérience, il est nécessaire de ne pas laisser s'écouler un trop long espace de temps entre le moment du remplissage du flacon et le moment où l'on effectue la détente. Dans le cas contraire, on n'obtient aucun brouillard en se plaçant dans les mêmes conditions que précédemment.

L'expérience ne réussit pas non plus quand on remplace l'air actif primitif, par de l'air filtré sur du coton.

Au contraire, si l'on introduit dans le flacon un peu de fumée de tabac dont la présence ne trouble pas sensiblement l'air du flacon, on constate qu'elle le rend extraordinairement actif.

Ces faits s'expliquent aisément en admettant que l'air à l'état normal renferme des poussières très fines, beaucoup plus ténues que celles qui sont décelées par un rayon de soleil pénétrant dans une chambre noire. Ce sont ces poussières qui provoqueraient la condensation au moment de la détente et serviraient de centres de condensation pour les gouttelettes de brouillard. L'action de la fumée de tabac s'explique d'une manière analogue.

Pour vérifier que les poussières de l'air étaient bien la cause du phénomène, Coulier eut l'idée de puiser de l'air dans la flamme de l'alcool brûlant avec excès d'air; toutes les poussières devaient y être brûlées et par suite

cet air devait être inactif. L'expérience montra qu'au contraire, cet air était beaucoup plus actif que l'air ordinaire.

De l'air inactif devenait actif si l'on portait au rouge, pendant un temps très court, un fil de platine disposé dans le flacon servant aux expériences de condensation.

Mascart, ayant répété ces expériences, reconnut qu'il était possible de les réaliser avec des liquides autres que l'eau, en particulier l'alcool et la benzine. Il montra en outre que l'air ozonisé devient très actif. Dans ces dernières expériences le filtre de coton n'enlevait pas à l'air son activité.

Il résulte de l'ensemble de ces faits, que, si dans certains cas, le phénomène de condensation produit par une légère détente, peut être attribué à l'existence dans l'air de particules ténues, solides ou liquides, il en est d'autres pour lesquels cette explication ne peut convenir.

Pour étudier le rôle des poussières dans la condensation de la vapeur d'eau, Aitken [1] se servait de deux récipients dont l'un contenait de l'air ordinaire et l'autre de l'air filtré sur un tampon de coton; un jet de vapeur était dirigé à volonté dans chacun des récipients et l'on observait que le premier se remplissait de brouillard, alors que l'autre restait transparent. Le brouillard obtenu par un premier jet de vapeur était très fin et très dense, les fines gouttelettes flottaient dans l'air et tombaient très lentement.

En répétant l'expérience plusieurs fois de suite, on constatait la formation d'un brouillard de moins en moins dense correspondant à la formation de gouttes de plus en plus grosses tombant de moins en moins lentement.

A un moment donné, il ne se formait plus de brouillard, mais on pouvait encore observer une pluie fine, de plus

---

[1] AITKEN, *Trans. of. the Royal Soc. of. Edimburgh*, t. XXX, p. 337-368.

en plus rare, et finalement on n'obtenait plus aucune condensation.

L'air dépourvu de poussières demeure sursaturé après l'arrivée du jet de vapeur, et si l'on fait alors pénétrer dans le récipient de l'air non filtré, il se produit sur le passage de cet air, une abondante condensation qui permet de suivre le trajet du gaz. De ces expériences, on peut déduire que les poussières sont des centres capables de provoquer la condensation de la vapeur dès qu'elle est très légèrement sursaturante.

Elles montrent aussi *comment il est possible de se débarrasser de ces centres, grâce à la formation et à la chute d'une série de brouillards.*

Cette constatation, très importante, sera fréquemment utilisée dans la suite.

Aitken fit encore l'expérience suivante : Dans un gros ballon, on provoquait la combustion d'un gaz *privé de poussières* dans de l'air également *débarrassé de poussières*; les produits de la combustion étaient reçus dans un second ballon dans lequel il était possible d'injecter de la vapeur; le jet de vapeur provoquait une abondante condensation.

Il existe donc des centres autres que les poussières capables de produire la condensation de la vapeur faiblement sursaturante.

C'est Helmholtz (1) qui a prouvé que la sursaturation en l'absence de poussières ne peut cesser que par diffusion vers les parois, et que les centres sont nécessaires.

La condensation de la vapeur d'eau peut aussi être provoquée en utilisant un phénomène électrique et voici une expérience due également à Helmholtz.

On provoque la sortie d'un jet de vapeur d'eau par un orifice étroit (dimensions de $1^{mm}$ à $2^{mm}$ de diamètre)

(1) Von Helmholtz, *Wiedemann's Annalen*, t. XXXII, 1887, p. 1 à 19.

auprès duquel on dispose une pointe métallique reliée à un pôle de machine électrique. Dès que l'on provoque l'écoulement de l'électricité par la pointe en actionnant la machine, le jet de vapeur change d'aspect; si on l'observe par diffraction sur un fond sombre, on constate qu'alors il se détache mieux et que, en outre, il prend des colorations analogues à celles que présentent les brouillards observés en lumière diffractée.

On peut encore projeter en ombre chinoise le jet de vapeur dont l'ombre est légère dans les conditions normales; l'écoulement de l'électricité donne l'impression d'un panache de fumée.

Si l'on rapproche les pôles de la machine, de façon à faire jaillir des étincelles à de courts intervalles, à chaque étincelle le panache de fumée fait place à l'ombre primitive pour réapparaître dans l'intervalle des deux étincelles.

L'écoulement de l'électricité par la pointe provoque donc aussi la condensation de la vapeur d'eau.

Le même phénomène a été observé avec un jet de vapeur d'alcool, mais alors il était beaucoup plus faible.

Dans l'expérience réalisée avec la vapeur d'eau et la pointe électrisée, le phénomène de condensation se produisait *pendant* que l'électricité s'écoulait.

Dans une seconde série d'expériences, von Helmholtz et Franz Richarz [1] ont montré que la condensation pouvait encore être obtenue environ 2 minutes après que toute déperdition avait cessé. On faisait arriver, sur un jet de vapeur, un courant d'oxygène pur et sec qui avait passé sur une pointe de platine reliée à l'un des pôles d'une machine à influence; la condensation était énergique.

Dans cette expérience, l'air était fortement ozonisé, et l'on aurait pu chercher dans ce phénomène la cause de

---

(1) Von Helmholtz et F. Richarz, *Wiedemann's Annalen*, t. XL, 1890, p. 161 à 202.

la condensation; von Helmholtz s'est assuré par une expérience directe que dans l'air dépourvu de poussières, l'ozone n'agit pas sur le jet de vapeur.

En faisant passer préalablement le gaz dans une ampoule de caoutchouc, on pouvait le lancer par intermittences sur le jet de vapeur et l'on observait ainsi des condensations. Si l'on pressait sur l'ampoule quelques instants après l'arrêt de la déperdition électrique, le jet de gaz agissait encore sur le jet de vapeur, et cela au bout d'un temps pouvant atteindre 2 minutes environ.

Il ne s'agit donc pas ici d'*une action directe de l'électricité sur la vapeur.*

L'électricité produit sur le milieu injecté dans la vapeur (ici l'oxygène) *une modification qui persiste alors que le phénomène électrique a cessé* et qui rend ce milieu apte à réagir sur le jet de vapeur.

Les mêmes auteurs ont encore obtenu une action très intense sur un jet de vapeur disposé entre deux conducteurs reliés aux pôles d'une bobine de Ruhmkorff et assez éloignés pour qu'aucune étincelle visible puisse jaillir entre ces conducteurs. Chaque rupture du primaire produisait une condensation instantanée du jet, les fermetures étaient sans effet. Cette action était due à la décharge invisible qui s'effectue entre les deux conducteurs.

On pourrait attribuer le phénomène à la présence de particules solides arrachées aux électrodes; pour éviter cette objection on avait enveloppé les électrodes de papier filtre mouillé, le résultat avait été encore le même.

Quand les décharges ont lieu dans l'air, il se forme de l'eau oxygénée, de l'acide azotique et divers composés auxquels on pourrait attribuer une influence sur le jet de vapeur. Les auteurs ont levé l'objection en opérant dans des gaz purs dans lesquels ces produits ne pouvaient prendre naissance.

L'action sur le jet d'eau est donc bien due *à une action électrique sur le milieu gazeux en expérience.*

L'expérience suivante de M. Barus (1) rappelle celle d'Helmholtz. Au lieu de l'aigrette, M. Barus fait agir un morceau de phosphore placé à peu de distance de l'orifice par où s'échappe la vapeur. Le voisinage du bâton de phosphore active la condensation du jet de vapeur de la même façon que l'aigrette.

D'ailleurs, les fumées émanant du phosphore ne provoquent plus la condensation si, avant de les lancer dans un jet de vapeur, on les envoie dans un flacon, ou encore si au voisinage du jet il n'y a aucune trace de phosphore non oxydé, comme l'ont prouvé les expériences de M. Shelford Bidwell (2). M. Barus (3) a étudié dans une série de Mémoires l'action du phosphore sur l'air avoisinant et, a utilisé pour cela, le phénomène de condensation. Il observait à l'aide d'un dispositif optique spécial la coloration présentée par le jet.

Dans la première expérience de M. Barus, la vapeur du jet est partiellement sursaturante; en opérant différemment on peut montrer que le phosphore est capable de provoquer la condensation de la vapeur d'eau *simplement saturante.*

L'expérience a été faite par M. E. Bloch (4) qui a étudié l'action complexe exercée par le phosphore sur l'air environnant.

L'air sec qui a passé sur du phosphore renferme des poussières très ténues invisibles à la lumière diffuse, mais visibles quand on les éclaire fortement avec la lumière

---

(1) Barus, *American Meteorological Journal*, mai 1903.

(2) Shelford Bidwel, *Nature*, t. XLIX, 1893, p. 212.

(3) Barus, *Science*, t. XI, 1900, p. 201; t. XIII, 1901, p. 501; *Phys. Review*, t. X, 1900, p. 257; *Phil. Mag.*, 6e série, t. I, 1900, p. 572; 6e série, t. II, 1902, p. 40, 391, 477; 6e série, t. III, 1902, p. 80.

(4) E. Bloch, *Thèse de doctorat*, Paris, juin 1904.

d'un arc intense. Si cet air passe à la surface de l'eau, il produit une condensation de la vapeur d'eau simplement saturante.

L'action produite par le phosphore est donc exceptionnelle au point de vue de la condensation. On retrouve cette même particularité dans les gaz préparés par voie électrolytique.

Ces gaz ont été étudiés par M. Townsend (1) et je ne retiendrai pour l'instant que leur action sur la vapeur d'eau. Les gaz (H et O )préparés par électrolyse de l'eau légèrement acidulée passent d'abord dans un barboteur contenant de l'iodure de potassium destiné à enlever toute trace d'ozone, puis dans un autre barboteur contenant de l'eau distillée; on observe alors la formation d'un nuage.

M. E. Bloch (2), qui a étudié l'action des gaz récemment préparés a observé que la plupart d'entre eux sont capables aussi de condenser la vapeur d'eau simplement saturante.

On observe en effet fréquemment qu'un gaz, au sortir de l'appareil dans lequel on vient de le préparer, provoque un nuage abondant en traversant un flacon laveur contenant de l'eau distillée.

Cette action des gaz récemment préparés se complique d'ailleurs du fait qu'ils ont traversé l'eau du flacon laveur, le simple barbotage ayant en effet la faculté de procurer aux gaz des propriétés nouvelles comme on le verra plus loin.

Enfin, M. C.-T.-R. Wilson (3) a montré que de l'air soumis à l'action prolongée de radiations ultraviolettes intenses est capable de produire la condensation de vapeurs *non saturantes*.

---

(1) Townsend, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, t. IX, Part V, et *Phil. Mag.*, 5e série, t. XLV, 1898, p. 125.

(2) E. Bloch, *Thèse de doctorat*, Paris, juin 1904.

(3) C.-T.-R. Wilson, *Phil. Trans.*, t. CXCII, 1899.

Dans d'autres expériences, sur lesquelles je reviendrai en détail plus tard, M. Wilson a montré par contre que la détente d'un gaz privé de poussières en présence d'un excès d'eau ne présentait aucune condensation tant qu'on n'atteignait pas une limite inférieure de sursaturation. Si ce gaz est soumis à l'action des rayons de Röntgen, la condition limite est la même, mais le phénomène est beaucoup plus intense.

En résumé : *La condensation de la vapeur d'eau a été obtenue dans des conditions expérimentales très variées et sous des actions diverses. Certaines de ces actions provoquent la condensation de la vapeur d'eau faiblement sursaturante, d'autres provoquent la condensation de la vapeur d'eau simplement saturante, d'autres sont même capables de provoquer la condensation de vapeurs non saturantes. Enfin, dans certains cas, la condensation ne peut être produite en présence d'un excès d'eau, que si la sursaturation atteint une valeur supérieure à une certaine valeur limite.*

Si on laisse de côté l'action des poussières, on voit que parmi les causes capables de produire la condensation, il en est d'origine électrique (aigrette, décharges invisibles, gaz préparés par voie électrolytique, rayons X) alors que d'autres ne paraissent pas se rattacher à l'électricité.

Nous verrons pourtant qu'il est possible de découvrir une origine électrique à la plupart de ces phénomènes, de sorte que la condensation de la vapeur d'eau produite dans les expériences qui ont été rappelées peut toujours être attribuée *soit à des poussières, soit à des centres électrisés, soit aux effets superposés des poussières et des charges électriques.*

## CHAPITRE II.

### Hypothèse des ions.

La conductibilité électrique des liquides et leur décomposition électrolytique sont des phénomènes bien connus actuellement et qui s'expliquent par la dissociation partielle des molécules du sel dissous en atomes ou groupes atomiques possédant des charges égales et de signes contraires, et qu'on appelle des *ions*.

Les molécules neutres et les ions circulent au hasard dans le liquide, se rencontrent, et ces chocs produisent de nouvelles molécules neutres par la recombinaison de deux ions de signes contraires, ou bien de nouveaux ions par suite de la dissociation de nouvelles molécules neutres. Ces transformations contraires s'équilibrent à peu près et le nombre de molécules dissociées reste très sensiblement le même.

Si l'on plonge dans le liquide deux électrodes reliées aux pôles d'une pile, les ions ne vont plus à l'aventure, ils s'orientent sous l'action du champ électrique : les ions positifs sont attirés par la cathode, les négatifs par l'anode. Au contact des électrodes, ils se déchargent et deviennent des atomes électriquement neutres qui sont libérés s'il ne se produit pas d'actions secondaires.

Chaque ion, au moment où il devient un atome neutre, cède sa charge appelée *électron* à l'électrode en contact, et l'on peut envisager le courant électrique comme constitué par un mouvement d'électrons libres passant d'un atome à l'autre.

On pourrait considérer le courant comme résultant du double mouvement des électrons positifs et négatifs en sens contraires. Par analogie avec ce qui a été admis pour les gaz, on pourrait aussi admettre que l'électron négatif seul est libre, et l'on expliquerait ainsi le courant

électrique : il serait dû au mouvement des électrons négatifs réellement cédés à l'anode par l'ion négatif ; l'ion positif ne céderait pas d'électron positif à la cathode, mais prendrait au contraire un électron négatif.

Les électrolytes et les corps métalliques ne sont pas les seuls conducteurs de l'électricité, dans certaines conditions l'air et les gaz peuvent aussi être le siège de courants électriques (*fig.* 2). M et N sont deux plateaux

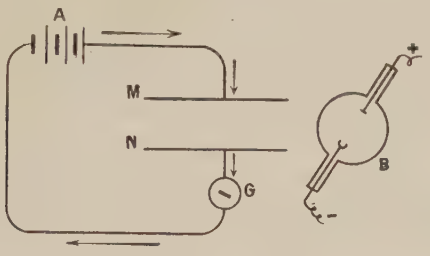


Fig. 2.

métalliques reliés aux pôles d'une batterie d'accumulateurs A ; quand l'air qui sépare ces plateaux est soumis à l'action des rayons de Röntgen issus de B, *il laisse passer un courant électrique* comme le ferait une solution saline. C'est ce qu'indique un galvanomètre très sensible G placé sur le circuit.

Toutefois, ce courant est soumis à certaines lois particulières, différentes de celles qui régissent la conductibilité des métaux et des liquides.

C'est ainsi que, si l'on augmente peu à peu la tension de la batterie de façon à la rendre deux, trois, quatre fois plus grande, l'intensité ne devient pas deux, trois ou quatre fois plus grande comme cela a lieu avec les conducteurs ordinaires. Dans ces expériences, au début il y a bien proportionnalité entre l'intensité et la tension, mais l'intensité croît ensuite de plus en plus lentement et finit par être à peu près insensible à l'augmentation de la tension.

On donne à ce courant d'intensité maxima le nom de *courant de saturation.* Sa valeur dépend essentiellement de la façon dont le gaz est ionisé par les rayons de Röntgen.

Si la *dissociation électrolytique* rend compte des phénomènes observés dans l'étude de la conductibilité électrique des liquides, elle ne permet pas d'expliquer la conductibilité électrique des gaz. Cette dissociation devrait, par exemple, provoquer une décomposition du gaz comme elle provoque la décomposition du liquide conducteur, or l'expérience indique une décomposition insignifiante.

On peut encore expliquer la conductibilité des liquides en admettant une dissociation différente appelée *dissociation électrique.*

Par exemple, dans le cas du chlorure de sodium, l'atome de sodium serait primitivement neutre par suite de la présence de deux charges égales et de signes contraires; l'électrolyse produirait la dissociation électrique des charges de cet atome. La charge positive resterait sur l'atome métallique qui constituerait l'ion positif; quant à l'électron négatif, il serait retenu par l'atome de chlore qui constituerait alors l'ion négatif. Dans l'atome neutre, l'électron est attiré par l'ion positif et la séparation nécessite la mise en jeu d'une certaine énergie; elle est très petite pour les corps en solution aqueuse.

Ainsi envisagée, la conductibilité électrique des liquides peut être rapprochée de la conductibilité électrique des gaz. De même que pour les liquides, la conductibilité des gaz est due à la présence d'*ions,* c'est-à-dire de centres électrisés les uns positivement, les autres négativement.

On admet en effet qu'un gaz contient des centres électrisés libres, ordinairement en très faible quantité, d'où la faible conductibilité des gaz dans les conditions usuelles. Sous certaines influences, le gaz s'*ionise,* c'est-à-dire qu'un grand nombre de ses atomes, électriquement neutres par compensation subissent la dissociation électrique.

L'un de ces atomes peut en effet être considéré comme formé d'une masse très fortement chargée d'électricité positive autour de laquelle gravitent une multitude de corpuscules chargés négativement; l'ensemble est neutre. Sous certaines actions, en particulier celle des rayons de Röntgen, un corpuscule se détache entraînant une charge négative et le reste de l'atome à une charge positive égale; mais il sera beaucoup plus difficile de détacher un deuxième ou un troisième corpuscule en raison de l'excès de la charge positive totale non altérée sur la charge négative restante, à plus forte raison sera-t-il encore plus difficile d'arracher une charge positive. D'où l'idée que les électrons négatifs seuls existent à l'état libre.

L'atome est donc partagé en deux morceaux, mais ces morceaux sont très inégaux, le corpuscule est très petit par rapport à l'atome; on estime que sa masse vaut $\frac{1}{2000}$ de celle de l'atome d'hydrogène. A ces centres électrisés peuvent s'unir, par attraction électrique des atomes ou des molécules neutres pour former des groupes ayant la même charge, mais possédant une masse beaucoup plus grande. C'est à ces agglomérations électrisées positivement ou négativement qu'on donne le nom d'*ions*.

Dans ces conditions, la conductibilité de l'air observée dans l'expérience précédente, s'explique fort bien ainsi que l'existence du courant de saturation : Sous l'influence du champ, les ions s'orientent; les ions négatifs se dirigent vers la plaque positive et les ions positifs vers la plaque négative; là, ils perdent leurs charges, ce qui donne naissance au courant.

La vitesse de déplacement de ces ions est d'autant plus grande que la tension est elle-même plus grande, et les charges abandonnées par unité de temps sont aussi plus grandes. Il arrivera un moment où le nombre d'ions abandonnés par seconde sera égal au nombre d'ions créés par seconde sous l'action des rayons de Röntgen. A

partir de ce moment l'intensité du courant n'augmentera plus quand bien même la tension continuerait à croître.

En l'absence de champ électrique, ces ions se meuvent en tous sens comme les molécules du gaz, et le déplacement d'ensemble est dû uniquement à la diffusion; on admet que, sous ce rapport un ion se comporte comme une molécule indépendante. Sous cette influence, et grâce aux mouvements internes admis par la théorie cinétique des gaz, les ions voyagent à l'intérieur de la masse gazeuse vers les parois, au contact desquelles ils abandonnent leur charge pour retourner à l'état neutre.

Le *coefficient de diffusion* des ions dans l'air se définit comme le coefficient de diffusion d'un gaz dans un autre. Dans le cas de l'air ionisé par les rayons de Röntgen il a pour valeur 0,028 pour les ions positifs et 0,043 pour les ions négatifs. C'est la première dissymétrie signalée entre ces deux espèces d'ions.

Ces nombres permettent de conclure que les ions positifs sont plus gros que les ions négatifs; et comme d'autre part, le coefficient de diffusion de l'air est 0,150, on peut encore en conclure que les ions sont plus gros que les molécules des gaz dans lesquels ils se forment.

Dans le mouvement correspondant à la diffusion, il se produit en outre des collisions entre les ions et les molécules neutres; ces dernières peuvent être brisées et alors donner naissance à de nouveaux ions. Inversement, la rencontre de deux ions de signes contraires peut donner naissance à une molécule neutre, il y a alors recombinaison.

Grâce à cette recombinaison et à la diffusion vers les parois, on s'explique pourquoi le nombre d'ions formés dans un gaz par une action ionisante quelconque, ne peut pas dépasser une certaine limite.

La recombinaison des ions de signes contraires se fait suivant la loi de Guldberg et Waage pour les réactions

chimiques entre molécules placées dans un milieu liquide ou gazeux : la vitesse de réaction est proportionnelle au produit des concentrations (masse par unité de volume) des molécules agissantes. Si donc $p$ et $n$ sont les nombres d'ions positifs et négatifs par unité de volume, on a

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dn}{dt} = -\alpha pn.$$

La constante $\alpha$ s'appelle *le coefficient de recombinaison.* Pour l'air ionisé par les rayons de Röntgen l'expérience donne $\alpha = 3400$.

Sous l'action d'un champ électrique d'intensité $x$, les ions positifs suivent les lignes de force du champ avec une vitesse qui a pour valeur $k_1 x$; les ions négatifs vont en sens inverse avec une vitesse $k_2 x$. Ces constantes $k_1$ et $k_2$ s'appellent les *mobilités* des ions positifs et négatifs; elles représentent les vitesses de ces ions dans un champ électrique d'intensité unité.

Les mobilités des différents ions que l'on rencontre dans les expériences sont au moins de l'ordre de $1^{cm}$ par seconde dans un champ de 1 volt par centimètre; elles sont en général plus grandes pour les ions négatifs que pour les ions positifs. Ainsi dans l'air ionisé par les rayons de Röntgen, la mobilité est $1^{cm},4$ pour les ions positifs et $1^{cm},7$ pour les ions négatifs (à la température et à la pression ordinaires).

Ces nombres confirment ce qui a été dit précédemment au sujet de la grosseur comparée des ions positifs et négatifs, et soulignent encore la dissymétrie observée en étudiant les coefficients de diffusion.

La connaissance des mobilités et des coefficients de diffusion a permis de comparer la charge d'un ion gazeux à celle portée par un atome d'hydrogène dans l'électrolyse, $e$ étant la charge d'un ion gazeux, $e'$ la charge d'un ion électrolytique monovalent, on a trouvé pour le rap-

port $\frac{e}{e'}$ la valeur 1,07. On peut donc conclure de là : *La charge électrique d'un ion gazeux quelconque est la même en valeur absolue que la charge transportée dans l'électrolyse par un atome d'hydrogène ou plus généralement par un atome monovalent quelconque.*

MM. J.-J. Thomson (1) et H.-A. Wilson (2) ont effectué la mesure en valeur absolue de cette charge et le nombre trouvé est $e = 3.4 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques ou $e = 1{,}1 \times 10^{-20}$ unités électromagnétiques C.G.S.

De son côté M. Pellat, en s'appuyant uniquement sur les données des phénomènes électrolytiques a trouvé que la valeur de la charge d'un atome monovalent devait être un peu inférieure à $1{,}6 \times 10^{-20}$ unités électromagnétiques C.G.S. Cet accord est tout à fait remarquable.

On peut considérer cette charge comme une unité naturelle d'électricité; c'est jusqu'ici la plus petite charge que nous puissions concevoir isolée.

C'est M. Townsend qui a montré la généralité du fait en opérant sur des gaz autres que l'air.

Le fait qu'on ne rencontre jamais d'ions plurivalents rend l'hypothèse de la dissociation électrolytique bien improbable.

Comme nous l'avons vu, cette hypothèse des ions rend compte des phénomènes de conductibilité électrique et en particulier du courant de saturation. Elle rend compte aussi de la décharge de l'électroscope par les rayons Röntgen ou le radium et permet l'étude des rayons cathodiques et des phénomènes de radioactivité. Ces différents points ont été traités dans la thèse de M. Langevin (3).

Un grand nombre de causes sont capables de produire l'ionisation d'une masse gazeuse :

---

(1) J.-J. Thomson, *Phil. Mag.*, t. XLVI, 1898, p. 528-545; 6e série, t. V, 1903, p. 341-355.

(2) H.-A. Wilson, *Phil. Mag.*, 6e série, t. V, 1903, p. 429-441.

(3) Langevin, *Thèse de doctorat*, Paris, 1902.

1° Les gaz des flammes sont ionisés, et nous avons vu que c'est en utilisant de tels gaz que Coulier et Aitken produisaient de fortes condensations.

2° Un fil conducteur porté au rouge par le passage d'un courant électrique provoque l'ionisation du gaz qui l'entoure, et c'est à l'aide d'un tel gaz que Coulier réalisa certaines expériences de condensation.

3° La production d'une aigrette dans un milieu gazeux développe des centres électrisés positivement ou négativement suivant que la pointe est en relation avec le pôle positif ou négatif d'une machine électrique. Les centres électrisés de nom contraire à la pointe qui se forment probablement sont vivement attirés par celle-ci et disparaissent presque immédiatement. Or, c'est à l'aide d'une aigrette que von Helmholtz provoquait la condensation de son jet de vapeur.

4° L'air qui a passé sur du phosphore est également ionisé, et c'est à l'aide d'un morceau de phosphore que M. Barus répétait une expérience analogue à celle de Helmholtz. C'est également avec de l'air ayant passé sur du phosphore que M. E. Bloch a obtenu des phénomènes de condensation.

5° Les gaz préparés par voie électrolytique (Townsend) et les gaz récemment préparés (E. Bloch) sont ionisés, et nous avons vu que ces gaz provoquaient un nuage abondant dans un laveur contenant de l'eau distillée.

6° Le barbotage d'un gaz dans l'eau acidulée et certains liquides provoque à lui seul le phénomène d'ionisation; il a été spécialement étudié par M. L. Bloch [1] qui a relié cette action ionisante à celle produite par les gaz récemment préparés, et d'une manière générale à l'ionisation par action chimique. L'ionisation par bar-

[1] L. Bloch, *Ann. de Chim. et de Phys.*, mars 1911.

botage complique toujours le phénomène observé sur les gaz préparés par voie humide.

7° La lumière ultraviolette tombant sur une lame métallique y détermine une émission d'électrons négatifs qui a pour résultat la décharge rapide de la lame si elle était au préalable chargée négativement. C'est le zinc fraîchement nettoyé qui se prête le mieux à ce genre d'expériences et l'on désigne ce phénomène sous le nom de *phénomène de Hertz.*

Les radiations ultraviolettes les plus réfrangibles émises par l'étincelle électrique peuvent en outre provoquer *directement* l'ionisation des gaz qu'elles traversent comme l'a montré M. P. Lénard (1), et M. J.-J. Thomson a établi que ce cas pouvait être envisagé comme un cas particulier de l'effet photo-électrique de Hertz.

Nous avons vu précédemment que la lumière ultraviolette intense, après une action prolongée, provoquait la formation d'un brouillard même sans détente, et dans de l'air non saturé.

8° Les rayons de Röntgen provoquent une ionisation énergique de l'air traversé et M. C.-T.-R. Wilson a réalisé des expériences de condensation avec de l'air ainsi ionisé.

9° Enfin, les corps radioactifs, en particulier le radium ionisent également l'air ou les gaz environnants.

Les sources ionisantes sont donc nombreuses, mais ce sont ces deux dernières qui sont le plus ordinairement employées et nous verrons plus tard qu'elles diffèrent essentiellement des autres.

En rapprochant comme je l'ai fait les divers cas d'ionisation des expériences de condensation primitivement citées, on voit que dans tous les cas où le brouillard n'est pas produit par des poussières, il apparaît dans des gaz ionisés; il est donc tout naturel d'admettre que les ions

(1) P. Lenard, *Drudes Ann.*, t. I, 1900, p. 486.

jouent un rôle analogue aux poussières au point de vue de la condensation. Cette hypothèse a été contrôlée expérimentalement dans certains cas par M. C.-T.-R. Wilson; en captant les ions par un champ électrique convenable, la condensation ne se produisait plus alors qu'elle avait lieu en l'absence du champ.

Ainsi se trouve vérifiée l'origine électrique de certaines condensations qui tout d'abord ne paraissaient pas se rattacher à l'électricité, ce qui justifie l'opinion précédemment émise :

*Dans les expériences citées la condensation peut toujours être attribuée soit à des poussières, soit à des centres électrisés, soit aux effets superposés des poussières et des charges électriques comme l'a montré M. E. Bloch* (1) *en étudiant la condensation produite dans une masse d'air ayant passé sur du phosphore.*

Ces centres électrisés sont les ions, et cette propriété très remarquable de condenser la vapeur d'eau est une propriété des ions.

L'expérience a montré que, suivant les cas, la condensation se produisait avec de la vapeur d'eau faiblement sursaturante, ou simplement saturante ou même non saturante. Enfin, dans certains cas, la sursaturation doit atteindre une valeur minima pour que la condensation soit possible. Il est donc nécessaire d'admettre que tous les ions ne sont pas identiques.

L'étude de la mobilité a permis d'autre part d'établir une distinction entre les ions et de les classer en deux grands groupes :

1° Les *petits ions* ou *ions ordinaires*, produits en particulier par les rayons de Röntgen et les corps radioactifs dont la mobilité a été donnée;

2° Les *gros ions* dont la mobilité est très faible, environ

(1) E. Bloch, *Thèse de doctorat*, Paris, 1904.

1500 fois plus petite que celle des petits ions et qui ont par suite une masse beaucoup plus grande (d'où le nom qui leur a été donné).

MM. Elster et Geitel ont montré que l'air atmosphérique renferme normalement des ions ordinaires positifs et négatifs et M. Langevin (1) a reconnu en outre qu'il renferme également de gros ions.

Les petits ions ne provoquent la condensation de la vapeur d'eau que lorsque la sursaturation a atteint une valeur limite; les gros ions déterminent la condensation de la vapeur d'eau faiblement sursaturante ou simplement saturante.

Les gros ions existent en particulier dans les gaz des flammes, les gaz récemment préparés et ceux qui sont obtenus par voie électrochimique dans l'ionisation par barbotage et par action chimique, dans l'ionisation par le phosphore et par l'aigrette. Leur étude est le plus souvent complexe comme l'ont montré les travaux de M. E. Bloch (2) sur l'ionisation par le phosphore et ceux de M. L. Bloch (3) sur l'ionisation par action chimique et barbotage.

Quant aux noyaux produits par la lumière ultraviolette énergique et dont l'action est prolongée, ils paraissent dus à des centres électrisés qui croissent peu à peu et donnent naissance à des agglomérations résultant probablement d'actions chimiques. La présence de l'oxygène paraît en effet nécessaire pour produire des brouillards sans détente; ils auraient donc un caractère bien spécial qui ferait de ces centres des poussières électrisées assez grosses pour être visibles dans un faisceau lumineux.

Pour étudier la condensation de la vapeur d'eau sous l'influence des ions ordinaires, il importe donc de s'adresser

(1) Langevin, *C. R. Acad. Sc.*, t. CXL, p. 232.
(2) L. Bloch, *Thèse de doctorat*, Paris, 1904.
(3) L. Bloch, *Ann. de Chim. et de Phys.*, mars 1911.

aux deux sources ionisantes principales dont j'ai parlé, et qui ne produisent que ces ions. C'est ce qu'a fait M. C.-T.-R. Wilson qui a étudié la condensation de la vapeur d'eau contenue dans une masse d'air ionisé par les rayons de Röntgen.

## CHAPITRE III.

### Condensation. Expériences de M. C.-T.-R. Wilson (1)

*Condensation.* — La sursaturation momentanée, produite quand on détend brusquement un gaz saturé de vapeur d'eau, peut être mesurée par le rapport $\frac{m_1}{m_2} = S$ de la masse $m_1$ de vapeur contenue dans l'unité de volume de gaz sursaturé, à la masse $m_2$ suffisante pour la saturer à la même température. Or, dans un gaz privé de poussières, si la sursaturation n'atteint pas un degré suffisant, la condensation ne se produit pas, comme on l'a vu dans l'expérience de Coulier effectuée sur de l'air filtré.

Ce résultat a été expliqué par lord Kelvin (2) qui a démontré que la pression $\pi'$ de la vapeur en équilibre avec une goutte sphérique de rayon $r$ est *supérieure* à la pression $\pi$ au contact d'une surface liquide plane de la quantité

$$\pi' - \pi = \frac{2\rho}{\sigma - \rho} \frac{A}{r}$$

où $\sigma$ représente la densité du liquide, $\rho$ celle de la vapeur et A la tension superficielle.

Plus $r$ est petit, plus la différence $\pi' - \pi$ est grande, et cette formule rend compte de ce fait, que de la vapeur d'eau sursaturante par rapport à une surface plane ne

(1) C.-T.-R. Wilson, *loc. cit.*
(2) Lord Kelvin, *Phil. Mag.*, t. XLII, 1871, p. 448.

l'est plus par rapport à une goutte suffisamment petite. Or, dans un gaz privé de poussières, une goutte doit forcément, dans sa formation, commencer par être très petite, de l'ordre des dimensions moléculaires; pour s'accroître il faut que de la vapeur se condense, ce qui suppose la sursaturation; or la sursaturation doit être extrêmement grande d'après la formule précédente. D'où la difficulté de produire la condensation dans de l'air privé de poussières.

Si au contraire, l'air contient en suspension des poussières, elles servent de germes pour la formation des gouttes et le raisonnement précédent n'est plus applicable. La quantité d'eau condensée dépend uniquement du degré de sursaturation et se partagera entre les poussières. Si ces dernières sont peu nombreuses, les gouttes formées seront grosses et tomberont vite, on aura une condensation sous forme de pluie; si elles sont nombreuses, les gouttes seront petites, tomberont lentement et auront l'apparence d'un brouillard.

La présence d'une charge électrique sur le centre de condensation facilite grandement la formation de la goutte; de même qu'un corps électrisé attire les poussières voisines, de même le centre électrisé attire les molécules de vapeur d'eau de pouvoir spécifique élevé, la goutte grossit et la pression d'équilibre baisse, favorisant ainsi la condensation.

Cette diminution de la pression d'équilibre a été calculée par M. Blondlot [1]; le raisonnement est basé sur l'impossibilité du mouvement perpétuel et je vais le reproduire ici.

On suppose que dans un tube en U dont les branches sont recourbées et soudées de façon à constituer un vase fermé, on a introduit une certaine quantité d'eau. Les

---

(1) Blondot, *Journal de Physique*, t. III, 1884, p. 442.

deux branches sont verticales et l'air de l'appareil a été enlevé; le niveau est alors le même dans les deux branches. La température est invariable.

Imaginons qu'un plateau P, isolé et électrisé soit amené au-dessus de la surface du liquide dans l'une des

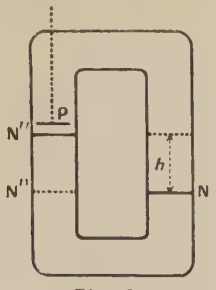


Fig. 3.

branches du tube en U. L'attraction électrique provoquera une élévation du niveau de l'eau dans cette branche ce qui déterminera un abaissement du niveau dans l'autre branche. Désignons par $h$ la différence des niveaux. Les choses demeurent en cet état indéfiniment.

On pourrait expliquer ce fait en admettant qu'il se produit une distillation de l'une des branches vers l'autre, mais alors ce serait admettre le mouvement perpétuel.

Admettons donc qu'il ne se produit ni évaporation, ni condensation aux surfaces N et N'; dans chaque branche au voisinage du liquide la vapeur est saturante sous la pression maxima de la vapeur. La différence des pressions maxima en N et N' est $h\rho$; $\rho$ étant le poids spécifique de la vapeur. Cette valeur représente l'excès de la tension en N. Cette expression peut se mettre sous une autre forme.

Le liquide se maintient soulevé en N' grâce à l'action de la pression électrostatique qui a pour valeur $2\pi\mu^2$ par unité de surface : ($\mu$ étant la densité électrique à la surface du liquide); grâce aussi à l'excès de pression que la

vapeur exerce en N et qui se transmet en N″ de bas en haut. On pourra donc écrire

$$2\pi\mu^2 + h\rho = h\sigma,$$

$\sigma$ étant le poids spécifique du liquide, d'où

$$h = \frac{2\pi\mu^2}{\sigma - \rho}.$$

La différence des tensions maxima a alors pour valeur

$$\frac{2\pi\mu^2\rho}{\sigma - \rho}. \qquad (1)$$

Dans le cas où l'on a affaire à une sphère liquide électrisée en équilibre avec sa vapeur saturante, si l'on désigne signe par $e$ la charge de la sphère, il vient

$$e = 4\pi r^2\mu.$$

D'où

$$\mu = \frac{e}{4\pi r^2}.$$

L'expression précédente (1) devient alors

$$\frac{e}{8\pi r^4}\,\frac{\rho}{\sigma - \rho}.$$

De sorte que si l'on désigne par $\pi'$ la pression d'équilibre d'une goutte non chargée, par $\pi''$ la pression d'équilibre d'une goutte chargée de même rayon, on peut écrire

$$\pi' - \pi'' = \frac{\rho}{\sigma - \rho}\,\frac{e^2}{8\pi r^4}.$$

M. Langevin et M. J.-J. Thomson [1] ont obtenu cette expression à l'aide d'un raisonnement basé sur les propriétés du potentiel thermodynamique. On trouvera plus loin le raisonnement de M. Langevin.

---

[1] J.-J. Thomson, *Applications of dynamics to Physics and Chemisty*, p. 164.

Cette *diminution,* qui rend la condensation plus faible, varie en raison inverse de $r^4$ alors que l'*accroissement* produit par la tension superficielle varie seulement en raison inverse de $r$.

L'action électrique aura donc, par rapport à l'action capillaire une importance d'autant plus grande que $r$ sera plus petit.

Si l'on retranche membre à membre la formule trouvée précédemment

$$\pi' - \pi = \frac{2\rho}{\sigma - \rho} \frac{A}{r}$$

et celle qu'on vient d'établir

$$\pi' - \pi'' = \frac{\rho}{\sigma - \rho} \frac{e^2}{8\pi r^4},$$

on obtient

$$\pi'' - \pi = \frac{\rho}{\sigma - \rho} \left( \frac{2A}{r} - \frac{e^2}{8\pi r^4} \right),$$

expression qui donne l'accroissement total de la tension maxima d'équilibre quand l'eau est sous la forme d'une gouttelette, et que cette gouttelette est électrisée; elle montre l'importance du terme soustractif quand $r$ est très petit.

Ainsi se trouve expliqué le pouvoir des ions au point de vue de la condensation.

*Expériences de M. C.-R.-T. Wilson.* — La figure ci-contre représente le dispositif de M. Wilson. Un cylindre B et un récipient A qui le surmonte constituent un espace pouvant être rempli par un gaz amené par une canalisation à robinets $T_2$ et $T_3$. Dans le cylindre B glisse un tube renversé P qui sert de piston; la partie inférieure plonge dans du mercure recouvert d'une couche d'eau. Un tube C fait communiquer l'intérieur du piston avec un espace où l'on peut produire diverses pressions Mis en relation avec l'atmosphère par le robinet $T_1$, le

piston P se soulève et s'élève d'autant plus que la pression initiale, est plus faible. Mis ensuite en relation avec un récipient F où une trompe fait continuellement le vide,

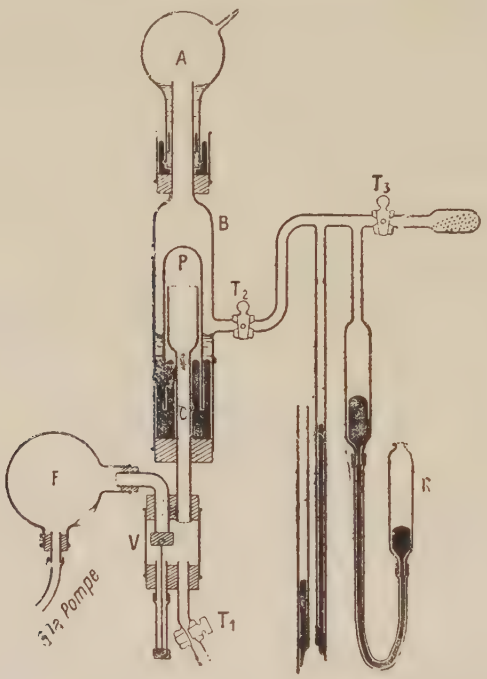


Fig. 4.

le piston P s'abaisse brusquement et vient buter contre une plaque de caoutchouc: On obtient ainsi une détente brusque du gaz emprisonné, et ce résultat est obtenu en tirant la valve V, le robinet $T_1$ étant fermé.

L'intérieur de la chambre est éclairé par une brillante flamme de gaz projetée par une lentille.

Si $v_1$ et $v_2$ représentent les volumes du gaz avant et après la détente, le rapport $\frac{v_2}{v_1}$ s'appelle le ***degré de détente.***

On règle le degré de détente en ouvrant le robinet $T_2$, $T_3$ restant fermé et le piston P étant au bas de sa course ; par la manœuvre du réservoir à mercure R on règle la pression qu'on veut avoir à la fin de la détente, et un manomètre à air libre donne sa valeur $p_2$ à la température ambiante ($p_2$ est toujours inférieur à la pression atmosphérique).

Ensuite on ferme $T_2$ et l'on ouvre $T_1$ ; le piston remonte à une hauteur d'autant plus grande que $p_2$ est plus faible ; l'air emprisonné se trouve alors sous une pression $p_1$ à peine supérieure à la pression atmosphérique agissant à l'intérieur de P. La différence très petite était déterminée par une expérience préalable. Après détente et réchauffement à la température ambiante la pression est redevenue $p_2$.

On obtient l'expression du degré de détente en appliquant la loi de Mariotte au gaz emprisonné. $\pi$ étant la pression maxima de la vapeur d'eau à la température de l'expérience, on a

$$v^2(p_2 - \pi) = v_1(p_1 - \pi).$$

D'où

$$(\alpha) \qquad \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1 - \pi}{p_2 - \pi}.$$

Connaissant $\frac{v_2}{v_1}$ il est possible de calculer la sursaturation qui correspond à chaque expérience.

Soient $T_1$ la température absolue de l'air avant la détente, $T_2$ la température absolue de l'air immédiatement après la détente ; les lois de Mariotte et de Gay-Lussac d'une part, la condition d'adiabatisme d'autre part permettent d'écrire

$$(a) \qquad \frac{p_2 v_2}{T_2} = \frac{p_1 v_1}{T_1}.$$

$$(b) \qquad p_2 v_2^{\gamma} = p_1 v_1^{\gamma},$$

$\gamma$ étant le rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant $\frac{C}{c}$. On tire

$$(c) \qquad \begin{aligned} p_2 \varphi_2^{\gamma-1} &= p_1 \varphi_1^{\gamma-1}, \\ \frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1}\right)^{\gamma-1}. \end{aligned}$$

Si $\pi_1$ et $\pi_2$ sont les pressions maxima ordinaires au contact d'une surface plane, la masse de vapeur contenue dans l'air avant la détente a pour valeur en C.G.S.

$$M_1 = \varphi_1 \frac{\pi_1}{760} \frac{1}{T_1} D \times 0{,}001293.$$

Après la détente adiabatique, s'il n'y avait pas condensation, la masse de vapeur serait la même qu'auparavant, mais le volume serait $\varphi_2$ et, par unité de volume, la masse de vapeur est

$$m_1 = \frac{M_1}{\varphi_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \frac{\pi_1}{760} \frac{1}{T_1} D \times 0{,}001293.$$

Mais il y a eu condensation et la masse de vapeur existant après la détente est

$$M_2 = \varphi_2 \frac{\pi_2}{760} \frac{1}{T_2} D \times 0{,}001293.$$

Par unité de volume, la masse de vapeur est

$$m_2 = \frac{M_2}{\varphi_2} = \frac{\pi_2}{760} \frac{1}{T_2} D \times 0{,}001293.$$

On tire

$$S = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \frac{\pi_1}{\pi_2} \frac{T_2}{T_1},$$

$$S = \frac{\pi_1}{\pi_2} \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_2}\right)^{\gamma}.$$

On connaît $\frac{\varphi_1}{\varphi_2}$ (équation $\alpha$) et $T_1$ température au moment de la détente. On trouvera donc $T_2$ (équation $c$), et à l'aide des tables on aura $\pi_1$ et $\pi_2$. On aura donc S.

Dans une première série d'expériences, l'auteur opérait sur de l'air non ionisé. Au début, une détente, même faible, provoquait l'apparition d'un nuage dû à la condensation de la vapeur d'eau sur les poussières contenues dans le gaz. Les nuages, en tombant, entraînaient les grains de poussière qui devenaient de plus en plus rares, et, après quelques opérations, une faible détente ne produisait aucune condensation.

Pour la produire à nouveau, il fallait atteindre un degré de détente $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$ correspondant à une sursaturation $S = 4{,}2$; à partir de cette *détente critique*, si l'on augmente progressivement S, les gouttes sont relativement peu nombreuses jusqu'à ce qu'on atteigne une seconde limite $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}38$ correspondant à $S = 8$. Au-dessus de cette valeur, le nombre des gouttes augmente très rapidement, et pour des valeurs très peu supérieures on obtient des brouillards très denses, disparaissant très lentement.

Pour interpréter ces résultats M. Wilson a émis l'opinion que pour une sursaturation supérieure à $S = 8$ la vapeur se condense sur ses propres molécules ou sur celles du gaz auquel elle est mélangée, alors que pour une sursaturation comprise entre $S = 4{,}2$ et $S = 8$ la condensation se produit sur des centres de nature spéciale existant dans le gaz en expérience.

L'auteur a trouvé ensuite qu'en répétant les expériences sur de l'air soumis aux rayons de R$^{o}$ntgen, on n'obtient pas de condensation pour des détentes inférieures à 1,25, mais que cette valeur une fois atteinte, on obtient des brouillards épais analogues à ceux que l'on obtenait dans les expériences précédentes pour des détentes supérieures à 1,38.

Le brouillard est d'autant plus intense que les rayons de Rontgen sont plus intenses, et qu'il s'est écoulé moins de temps depuis l'instant où ils ont cessé d'agir. On est

donc conduit à penser que les rayons de Röntgen produisent, en grande quantité dans le gaz en expérience, des centres de condensation analogues à ceux qu'il contenait à l'état normal, en très petit nombre seulement.

L'action des rayons uraniques produisait des effets analogues, l'auteur suggérait l'idée que ces centres devaient être identifiés avec les ions produits dans les gaz par l'action de ces rayons.

L'air humide contiendrait donc des ions en petite quantité.

Il restait à vérifier que ces centres étaient bien électrisés; la chambre de condensation a été modifiée dans ce but; la nouvelle chambre contenait deux plateaux métalliques entre lesquels on pouvait établir une différence de potentiel.

Sous l'action du champ, les ions positifs se déplacent dans le sens du champ et les ions négatifs en sens contraire et se déchargent au contact des plateaux. Plus le champ sera intense, plus le nombre des ions captés sera grand, et par suite, pour une détente donnée, plus la condensation sera faible. C'est bien ce que l'expérience a vérifié.

Si l'on produit la détente alors que les rayons de Röntgen ont été supprimés, presque tous les ions ont été captés, et au lieu du brouillard qu'on obtiendrait sans champ, on observe une pluie formée de gouttes rares.

Ainsi les centres de condensation sont électrisés et il est légitime de les assimiler aux ions.

Mais ces centres électrisés sont de deux sortes, les uns chargés positivement, les autres négativement. Sont-ils les uns et les autres capables de produire la condensation de la vapeur d'eau ?

M. Wilson a entrepris une nouvelle série d'expériences pour étudier cette question qui trouvait son application en Météorologie, dans la relation probable entre la pluie et l'électricité atmosphérique.

L'appareil employé est analogue au précédent; il possède une chambre de condensation cylindrique contenant deux plateaux métalliques parallèles dont l'un ferme l'appareil. Sur le côté du tube, et au niveau du plateau inférieur une fente horizontale de $3^{cm}$ de long et de $3^{mm},5$ de large est pratiquée dans le verre et fermée par une lamelle mince d'aluminium. A l'aide d'un inverseur, on établit entre les plateaux un champ de sens variable. Un écran de plomb épais protège la chambre et ne laisse

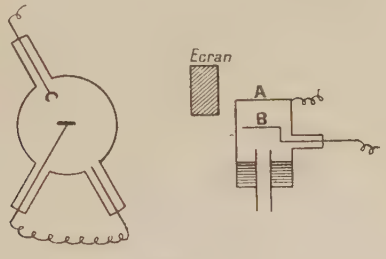


Fig. 5.

passer qu'un mince faisceau des rayons Röntgen qui rase le plateau inférieur. La surface plane de l'anticathode du tube focus était placée presque horizontalement de sorte que dans l'esprit de l'auteur, la source effective de rayons qui entraient dans la fente était presque linéaire. Seule la tranche d'air voisine du plateau inférieur devait être ionisée.

Les surfaces métalliques intérieures à la chambre étaient couvertes par du papier filtre humide pour maintenir l'air saturé de vapeur d'eau et pour éviter que des centres de condensation soient émis par le métal lui-même.

Une différence de potentiel de quelques volts était établie entre les deux plateaux; quand le plateau B était à un potentiel plus élevé que le plateau A, les ions négatifs ayant peu de chemin à parcourir étaient captés

immédiatement et les ions positifs prédominaient. C'était le contraire qui avait lieu quand le plateau B était à un potentiel moins élevé que le plateau A. Dans les premières expériences, la détente était produite sans qu'on ait auparavant supprimé les rayons.

Pour les détentes légèrement supérieures à 1,25, on obtenait des nuages relativement denses quand les ions négatifs prédominaient; on n'obtenait au contraire qu'une légère condensation quand il y avait excès d'ions positifs.

Pour des détentes atteignant la valeur de 1,35, les nuages obtenus étaient indépendants de la direction du champ et cela continuait ainsi jusqu'à la limite 1,38 pour laquelle des brouillards épais apparaissaient même en l'absence de rayons.

Dans le cas où les ions négatifs prédominent, la densité du brouillard résultant de la détente est pratiquement la même pour les valeurs comprises entre 1,28 et 1,38. Dans le cas contraire (ions positifs en excès), les gouttes restent peu nombreuses pour les détentes inférieures à 1,31 environ; à partir de cette valeur leur nombre croît et pour 1,33 on a des brouillards relativement épais, quoique moins épais que ceux obtenus avec des ions négatifs. Enfin, à partir de 1,35, on ne distingue plus les brouillards positifs des brouillards négatifs.

Ces résultats peuvent être interprétés d'une manière simple. La condensation se produit sur quelques-uns des ions négatifs lorsque $\frac{v_2}{v_1}$ atteint 1,25; pratiquement tous les ions négatifs sont utilisés quand $\frac{v_2}{v_1}$ dépasse 1,28; tandis que pour utiliser les ions positifs la détente doit dépasser 1,31 environ. Tous les ions positifs et négatifs sont utilisés quand $\frac{v_2}{v_1}$ dépasse 1,35.

Il existe donc une dissymétrie entre les ions positifs

et les ions négatifs relativement à leur pouvoir de condensation de la vapeur d'eau. Quand la détente est produite après suppression des rayons ($t = 1$ seconde), les résultats sont encore plus nets.

Dans le cas où les ions positifs prédominent, pour des détentes inférieures à 1,31, les gouttes ne sont pas plus nombreuses que lorsque les rayons n'agissent pas.

Un appareil double fut ensuite construit pour observer simultanément les effets produits par les ions des deux signes. La chambre de condensation était constituée par un récipient sphérique séparé en deux parties par une plaque métallique mince fermant une fente étroite parallèle à la plaque, qui laissait passer un faisceau de rayons

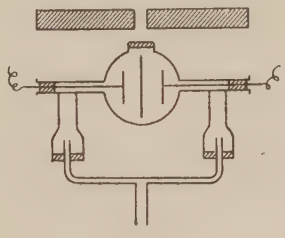

Fig. 6.

ionisants. Une plaque de plomb épaisse présentant une fente parallèle à la précédente ne laissait passer qu'un mince faisceau de rayons produisant seulement l'ionisation de deux couches minces de gaz de chaque côté de la cloison. Deux plateaux métalliques triangulaires permettaient de créer, de part et d'autre de la cloison centrale, des champs de sens différents de façon à faire prédominer d'un côté des ions négatifs, de l'autre côté des ions positifs.

L'anticathode du tube focus qui engendrait les rayons était fixée verticalement au-dessus de la plaque centrale de l'appareil. On illuminait une couche horizontale du gaz contenu dans les deux moitiés de la chambre.

On appréciait approximativement le nombre des gouttes produites dans chaque moitié, en mesurant le temps que la surface supérieure des nuages des deux côtés mettait à descendre au-dessous du niveau du faisceau lumineux, utilisé pour les rendre visibles. Les temps de chute étaient plus grands quand la condensation se produisait sur les ions négatifs que lorsqu'elle avait lieu sur les ions positifs pour des détentes comprises entre 1,25 et 1,31 environ.

Pour une détente déterminée, l'auteur mesurait le temps T de chute du nuage formé sur les ions négatifs, le temps T′ de chute du nuage formé sur les ions positifs et il prenait le rapport $\frac{T}{T'}$. Voici quelques résultats :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{v_2}{v_1}$ ... | 1,28 | 1,30 | 1,31 | 1,32 | 1,33 | 1,35 |
| $\frac{T}{T'}$ ... | 4,1 | 5,1 | 1,8 | 1,5 | 1,15 | 1,0 |

En passant de 1,30 à 1,31 le rapport passe de 5,1 à 1,8. Ces résultats concordent avec les précédents : la condensation commence à se produire sur les ions positifs pour des détentes supérieures à 1,31 jusqu'à 1,35; à partir de cette valeur les ions positifs ne se distinguent plus des ions négatifs au point de vue de la condensation de la vapeur d'eau.

Les résultats obtenus par M. C.-T.-R. Wilson présentent un grand intérêt; en particulier la différence que présentent les ions positifs et négatifs, relativement à leur pouvoir de condensation de la vapeur d'eau, a une grande importance. Les nombres donnés par l'auteur semblent très concluants; le seul reproche qu'on puisse adresser à cette méthode est d'avoir *un caractère subjectif*.

Comme ces expériences sont délicates, c'est sans doute cette difficulté qui explique que certains expérimentateurs ne soient pas parvenus à trouver des résultats aussi nets que le physicien anglais.

Je me suis proposé de reprendre ces expériences dans le but de rechercher s'il n'y avait pas des conditions plus particulièrement favorables à l'observation de la dissymétrie; j'ai surtout eu en vue de substituer *une méthode objective* d'observation à la méthode subjective de M. Wilson, et d'étendre le champ de mes recherches en opérant sur divers gaz et en utilisant diverses sources ionisantes.

## CHAPITRE IV.

### Reprise des expériences de M. Wilson.

L'appareil utilisé a été imaginé par M. Langevin; c'est une modification de celui de M. Wilson rendant les manœuvres plus simples. Il a été construit spécialement pour l'exécution de ce travail. J'ai d'ailleurs été amené au cours des expériences à lui faire subir quelques modifications afin de rendre son emploi plus commode.

Il se compose d'une chambre de condensation C fermée à sa partie supérieure par une plaque d'aluminium de $1^{mm}$ d'épaisseur, fixée à une couronne de verre rodé et s'adaptant exactement par un joint au suif sur le bord supérieur de la chambre. La tubulure inférieure, également rodée s'adapte par un joint au suif à la tubulure supérieure d'un cylindre de verre B portant une graduation en millimètres. Ce cylindre est encastré par sa base dans une garniture métallique qui repose elle-même sur une plate-forme portée par un cylindre métallique communiquant d'une part avec l'air extérieur par l'intermédiaire d'un tube à robinet R, d'autre part avec un gros récipient D, grâce à une soupape M qui se manœuvre de l'extérieur. Un tube partant de la partie supérieure permet en outre la communication avec le piston P constitué par un cylindre métallique creux terminé à sa

partie supérieure par une calotte sphérique. Vers la base de la calotte se trouve un trait circulaire servant de repère. On réunit le cylindre de verre et le cylindre métallique inférieur par l'intermédiaire d'une rondelle de caoutchouc suiffée, à l'aide de trois vis de serrage.

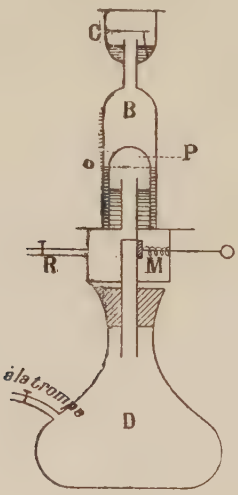


Fig. 7.

Le récipient D est mis en relation avec la trompe à eau.

Dans la chambre de condensation se place une plateforme métallique K portée par trois pieds métalliques plongeant dans un peu d'eau destinée à rendre plus sûrement l'atmosphère de la chambre saturée de vapeur d'eau, et reliant d'autre part le trépied à un anneau de platine soudé au verre. Entre le couvercle et la plateforme on peut établir une différence de potentiel.

Les dimensions du piston sont telles que lorsqu'il repose sur la rondelle de caoutchouc, le trait de repère qu'il porte se trouve en face du zéro de la graduation tracée sur le cylindre B.

On verse de l'eau dans le cylindre B; elle pénètre à l'intérieur du piston P et remplit l'intervalle compris entre le piston et le cylindre, formant ainsi un joint hydraulique.

Le robinet R étant ouvert, à l'aide d'un tube de caoutchouc, on injecte de l'air à l'intérieur du piston qui se soulève. Si l'on a versé suffisamment d'eau, le piston peut atteindre le voisinage du sommet du cylindre B sans que l'air injecté pénètre dans ce cylindre; on ferme alors le robinet R; si l'appareil est bien étanche, le piston doit rester à la même place.

On fixe alors le couvercle et l'on vérifie l'étanchéité de la chambre de condensation en ouvrant le robinet R; le piston ne doit pas descendre. On a ainsi emprisonné une masse déterminée d'air qui ne changera pas au cours des expériences, et l'appareil est prêt à fonctionner.

Le robinet R étant maintenu fermé et le vide étant produit dans D à l'aide de la trompe, on ouvre brusquement la soupape; le piston est alors vivement chassé vers le bas; il vient frapper sur la rondelle de caoutchouc et y reste appuyé grâce à la différence des pressions qui s'exercent à l'extérieur et à l'intérieur de P.

La valeur de la détente ainsi produite est la plus grande possible car $p_2$ a même valeur pour toutes les détentes, et c'est dans ce cas que $p_1$ a la plus petite valeur.

Pour les expériences suivantes, il suffit d'ouvrir lentement le robinet R; l'air pénètre dans le piston qui monte plus ou moins suivant le degré de détente que l'on se propose d'obtenir. Ensuite on provoque la détente comme il a été dit.

Il est bon d'avoir un indicateur de pression permettant de connaître approximativement la pression à l'intérieur du récipient D, car si cette pression descend au-dessous d'une certaine valeur, le piston n'est plus chassé à fond de course et la détente n'est plus complète.

Un tube en T permet de relier le vase D avec un tube

de verre vertical plongeant dans une cuvette de mercure. L'expérience donne la hauteur minima à laquelle le mercure doit s'élever dans le tube pour que l'appareil fonctionne convenablement.

On a à résoudre les deux problèmes suivants :

1° Connaissant la division $n$ en regard de laquelle se trouve le repère tracé sur le piston quand ce dernier est soulevé, quel est le degré de détente produit en faisant descendre brusquement le piston ?

2° On se propose de produire une détente de valeur déterminée, en regard de quelle division $n$ devra-t-on amener le repère tracé sur le piston ?

Désignons par $V_c$ le volume de la chambre supérieure vide; par $V_B$ le volume du cylindre de verre vide au-dessus du zéro, par $v_e$ le volume de l'eau au-dessus du zéro, le piston étant en bas, par $v'_e$ le volume de l'eau au-dessus du zéro de la graduation du cylindre B quand le piston est en haut, par C le volume de la calotte sphérique, par $v$ le volume du piston correspondant à une division de la graduation, par $a$ le volume de l'eau introduite dans la chambre supérieure.

Le piston étant en haut, son repère en face de la division $n$, le volume occupé par l'air est

$$V_c + V_B - C - v'_e - nv - a.$$

Le piston étant en bas, le volume occupé par l'air est

$$V_c + V_B - C - v_e - a.$$

Posons

$$V_c + V_B - C - a = W.$$

Dans cette expérience la valeur de la détente est

$$d = \frac{W - v_e}{W - v'_e - nv}.$$

De cette formule on peut tirer $n$ si au contraire on se donne $d$.

Dans l'appareil employé, $V_c = 207^{cm^3},6$, $V_B = 374^{cm^3},8$, $C = 63^{cm^3},5$, $v = 2^{cm^3},5$, $a = 15^{cm^3}$, $W = 503,9$. Le volume de *une* division du cylindre de verre est de $3^{cm^3}$.

Dans les expériences exécutées, quand le piston est au bas de sa course, l'eau monte toujours au-dessus du zéro, la calotte est donc plus ou moins noyée, et pour apprécier le volume $v_e$ il faut savoir ce que valent dans ces conditions 1, 2, 3, ..., divisions annulaires.

De 0 à 5, la courbure ne se fait pas sentir sensiblement et la valeur de *une* division annulaire est la même que dans la partie cylindrique, savoir : $3 - 2,5 = 0^{cm^3},5$.

De 5 à 10, on peut admettre que toutes les divisions sont égales et chacune égale à $0^{cm^3},6$; de 10 à 16, chaque division peut être considérée comme égale à $0^{cm^3},7$.

| | Divisions. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 16-17. | 17-18. | 18-19. | 19-20. | 20-21. | 21-22. | 22-23. | 23-24. | 24-25. |
| Capacité en cm³.. | 0,9 | 0,9 | 1 | 1 | 1 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,5 |

A partir de la division 20, les jaugeages deviennent difficiles à cause des effets de capillarité; au fur et à mesure que l'effet de la courbure se fait de plus en plus sentir, il se forme un ménisque qui rend l'appréciation du volume de plus en plus incertaine. De plus, l'eau ne mouille pas également bien les diverses parties du tube et les effets de capillarité qui se produisent ne sont pas toujours comparables. Les nombres indiqués sont évidemment des moyennes.

J'ai réalisé tout d'abord une série d'expériences dans le but de comparer les valeurs obtenues pour $v_e$ et $v'_e$; les résultats obtenus sont contenus dans le Tableau ci-contre (Tableau A) et montrent que la valeur $v'_e$ est sensiblement la même dans les diverses expériences. La concordance est très bonne tant que le niveau de l'eau n'atteint pas la partie de la calotte pour laquelle la courbure rend le jaugeage difficile.

TABLEAU A.

| Division $n$ en regard de laquelle se trouve le repère tracé sur le piston quand celui-ci est soulevé. | Division en regard de laquelle se trouve le niveau de l'eau quand le piston est soulevé. | | Division en regard de laquelle se trouve le niveau de l'eau quand le piston est en bas. | |
|---|---|---|---|---|
| 60..... | 32 un peu fort | Une division annulaire valant $0^{cm^3},5$, 32 divisions vaudront $16^{cm^3}$ forts. Pour toutes ces expériences $v'_e$ est le même et égal à 16. | 23 faible. | $v_1$. 17 faible. |
| 52..... | id. | | id. | |
| 70..... | id. | | id. | |
| 60..... | id. | | id. | |
| 50..... | id. | | id. | |
| 45..... | id. | | id. | |
| 32..... | id. | | id. | |
| 28..... | 32 qui se décomposent ainsi : | | id. | |
| | 22 divisions annulaires valant 0,5 chacune..... | $14^{cm^3}$ | | |
| | 4 divisions annulaires de la calotte valant également chacune $0^{cm^3},5$..... | 2 | | |
| | Total..... | 16 | | |
| 21..... | 31 se décomposant ainsi : | | id. | |
| | 21 divisions annulaires à $0^{cm^3},5$..... | 10,5 | | |
| | 10 divisions annulaires de la calotte..... | 5,5 | | |
| | Total..... | 16,0 | | |
| 15..... | 30 se décomposant ainsi : | | id. | |
| | 15 divisions annulaires à $0^{cm^3},5$..... | 7,5 | | |
| | 15 divisions annulaires de la calotte..... | 9 | | |
| | Total..... | 16,5 | | |

Les volumes de $v_e$ sont également très sensiblement les mêmes et le nombre trouvé est 17 faible. Si l'on tient compte de la difficulté éprouvée pour le jaugeage à partir de la division 20, quand il s'agit de la calotte sphérique, on peut attribuer à l'effet de la courbure l'écart observé dans la dernière mesure de $v'_e$, et l'on prendra pour valeur de cette grandeur le nombre $16^{cm^3}$ obtenu dans les conditions les plus favorables.

L'effet de la courbure se fait sentir dans le même sens pour $v_e$, il doit même être plus accentué, car au lieu de 15 divisions on a 23 divisions annulaires de la calotte. Pour cette raison on prendra aussi 16 pour valur de $v_e$, et cela d'autant mieux que le repère tracé sur le piston est légèrement au-dessus du zéro de la graduation quand le piston est au bas de sa course.

La formule précédemment établie devient

$$d = \frac{W - v_e}{W - v_e - nv},$$

d'où

$$n = \frac{(W - v_e)(d - 1)}{d \times 2,5},$$

Dans ces expériences, les formules précédentes donnent

$$d = \frac{487,9}{487,9 - n \times 2,5},$$

$$n = \frac{487,9\,(d - 1)}{d \times 2,5}.$$

Pour la valeur $d = 1,25$, on trouve $n = 39$; pour la valeur $d = 1,38$, on trouve $n = 53,7$.

Ce sont les deux valeurs extrêmes utilisées par M. Wilson. Dans une première série d'expériences effectuées sans champ, le trépied métallique était enlevé et la chambre était éclairée par un faisceau de rayons lumineux sensiblement parallèles provenant d'une lampe à arc et dirigés horizontalement (diamètre du faisceau cylindrique $1^{cm},5$).

L'appareil rempli d'air était abandonné à lui-même un certain temps, par exemple 12 heures, pour permettre aux poussières de tomber. Pour s'assurer qu'il en était bien ainsi, on vérifiait que des détentes faibles ne produisaient aucune condensation.

Dans ces conditions, pour $n = 37$ et pour les valeurs de $n$ inférieures à 37, on n'observe aucune condensation, ou seulement deux ou trois gouttes. Pour $n = 38$, quelques gouttes; pour $n = 39$ ($d = 1{,}25$), petite pluie; pour $n = 40$, pluie encore faible; pour $n = 41$, pluie encore assez rare; pour $n = 42$, pluie plus abondante. Pour des valeurs croissantes depuis $n = 42$ jusqu'à $n = 49$ environ, on observe une condensation de plus en plus abondante; mais d'une division à la suivante, l'augmentation est relativement peu sensible.

A partir de $n = 49$ ($d = 1{,}33$), la condensation croît nettement pour chaque division en plus; on obtient de véritables nuages de plus en plus épais et disparaissant de plus en plus lentement. Pour les valeurs

$$n = 53\ (d = 1{,}37), \qquad n = 54, \qquad \ldots,$$

ces nuages se transforment en des brouillards de plus en plus intenses qu'il devient difficile de comparer entre eux, mais qui semblent cependant croître très peu avec la détente.

A partir de $n = 58$ environ ($d = 1{,}43$), le brouillard qui prend naissance paraît être alors indépendant de la valeur du degré de détente. Cette valeur limite extrême concorde avec celle de M. Wilson [1] qui signale dans son premier Mémoire sur la condensation, que pour des valeurs de $d$ comprises entre 1,38 et 1,44 les nuages obtenus présentent de beaux phénomènes de coloration.

La limite supérieure du degré de détente est difficile

---

[1] C.-T.-R. Wilson, *Proc. of. the royal Soc.*, t. LXI, 1897.

à déterminer d'une façon précise, au voisinage de la détente 1,37, l'aspect des nuages change en effet d'une façon très sensible, on obtient des brouillards intenses dont on ne peut pas dire, cependant, qu'ils sont insensibles au degré de détente.

Dans chaque expérience, on attendait que le brouillard ou le nuage formé eût disparu, et l'on passait immédiatement à l'essai suivant.

J'ai dit que pour des valeurs de $n$ comprises entre 42 et 49, l'accroissement de la condensation était peu sensible d'une division à la suivante, et ceci m'a conduit à comparer un nuage, non pas au précédent, mais à un autre correspondant à une détente encore plus faible. Le nuage obtenu était alors nettement plus intense que celui observé pour la première fois avec le même degré de détente.

C'est ainsi que, si, après avoir observé la condensation relative au degré de détente 1,31 par exemple, on recommence l'expérience relative au degré de détente 1,27, le nuage obtenu alors est plus intense que celui qui s'était produit la première fois pour $d = 1{,}27$, alors qu'on avait effectué auparavant des expériences correspondant à des degrés de détente inférieures à 1,27.

J'appelle donc l'attention sur un fait important, *c'est qu'il n'est pas indifférent de réaliser les expériences dans tel ou tel ordre.*

Je me suis alors demandé ce qui arriverait après une expérience relative à $d = 31$, si je produisais une détente inférieure à la détente limite 1,25, par exemple

$$d = 1{,}21 (n = 35);$$

l'expérience a montré qu'on obtenait une condensation très nette.

Ceci prouve que, lorsque les nuages ont disparu, il reste encore dans l'atmosphère du ballon des centres résiduels

invisibles capables de produire la condensation pour des valeurs de la détente inférieures à la valeur critique 1,25, c'est-à-dire des centres se comportant comme des poussières.

Si la première condensation, obtenue avec des valeurs de $d$ supérieures à 1,25, est considérable, la seconde condensation, obtenue à l'aide des centres résiduels avec la détente 1,21, provoquée immédiatement après la disparition du premier nuage, est également considérable.

Quand le degré de détente est assez grand ($d > 1{,}33$) pour donner naissance à un nuage épais, après disparition du nuage, une nouvelle détente correspondant à $d = 1{,}21$ donne, grâce aux centres résiduels, un nuage sensiblement aussi intense que le nuage primitif.

Le nouveau nuage ainsi obtenu donne lui-même naissance à de nouveaux centres résiduels, à l'aide desquels on produira une nouvelle condensation pour la même détente 1,21, et ainsi de suite un certain nombre de fois d'autant plus grand que le nuage primitif était plus épais. L'intensité de ces nuages successifs diminue d'une expérience à l'autre, et d'autant plus lentement que le nuage initial est plus intense.

On s'explique dès lors comment il se fait, qu'ayant produit une condensation pour un degré de détente égal à 1,36, lorsque, après la disparition de ce nuage, on provoque une nouvelle condensation par une détente 1,27, on trouve un nuage plus intense que celui obtenu la première fois pour ce degré de détente : Les centres résiduels résultant de la détente 1,36 ont superposé leur action à celle des centres utilisés normalement pour la détente 1,27.

D'une manière générale, ces centres résiduels ne permettent pas l'observation correcte des phénomènes de condensation et il importe de les faire disparaître avant de passer d'une expérience à la suivante.

Pour cela, j'ai d'abord essayé l'action du temps, et j'ai

observé que, dans le cas d'un nuage épais, il était nécessaire d'attendre 30 ou 45 minutes pour obtenir la disparition de ces centres.

L'intervalle de deux expériences consécutives est alors beaucoup trop long.

On active un peu la disparition des centres en produisant successivement et fréquemment une série de détentes correspondant au degré de détente 1,21, et quand on n'obtient plus de condensation, on peut passer à l'expérience suivante.

Cette nécessité de revenir à l'état initial rend les recherches très longues et très pénibles, surtout quand on arrive aux degrés de détente un peu élevés.

J'ai donc recommencé mes expériences en m'astreignant à faire disparaître chaque fois les centres résiduels, c'est toujours pour $d = 1{,}25$ ($n = 39$), comme l'a indiqué M. Wilson, que commence la condensation. Cette dernière croît peu à peu avec la détente, mais les nuages obtenus sont moins denses que la première fois; l'accroissement signalé à partir de $n = 49$ ($d = 1{,}33$) pour chaque division est plus sensible que dans la première série d'expériences. Il semble qu'à partir de cette valeur il se produit quelque chose de particulier.

La limite supérieure du degré de détente s'obtient aussi dans de meilleures conditions; l'action des centres résiduels tend à augmenter l'intensité du brouillard déjà épais et rend plus difficile la comparaison de deux brouillards obtenus dans des expériences consécutives : Néanmoins, cette limite m'a toujours paru un peu incertaine; il n'est d'ailleurs pas facile de différencier des brouillards très épais, d'autant plus qu'ils se produisent à de longs intervalles (30 minutes) à cause du temps nécessaire à la disparition des centres résiduels.

Il ne semble pas que l'augmentation rapide de la condensation à partir de $d = 1{,}33$ ait été signalée par M. Wil-

son dans ses expériences sur l'air non soumis à l'action d'agents ionisants. Dans une Communication ultérieure [1] dont le résumé a été publié par la Société française de Physique [2], on trouve en effet la phrase suivante : « *Il n'y a condensation que si ce rapport* $\frac{v_2}{v_1}$ *dépasse* 1,25; *les gouttes sont relativement peu nombreuses s'il ne dépasse pas une seconde limite* 1,38; *au delà de cette valeur, l'accroissement du nombre des gouttes est extrêmement rapide et des brouillards très denses se produisent pour des détentes qui ne la dépassent que très peu.* » Il n'est pas fait allusion à un accroissement qui se produirait pour $d = 1{,}33$.

Un tel accroissement, pour cette valeur de la détente, n'est signalé que dans les expériences relatives à la dissymétrie des ions positifs et négatifs comme noyaux de condensation de la vapeur d'eau, et alors l'air est soumis à l'action ionisante des rayons de Röntgen. L'auteur observe en effet qu'à partir de ce moment les ions positifs donnent des brouillards relativement très épais.

J'ai répété ensuite ces expériences en soumettant l'air à l'action des rayons de Röntgen. Un tube focus est placé dans une caisse doublée de feuilles de plomb; une ouverture circulaire est percée à la base de la caisse de façon à laisser passer les rayons. Cette caisse est suspendue au-dessus de l'appareil à quelques centimètres de distance; on produit la détente pendant le passage des rayons.

*Résultats.* — Pour $n = 36$ et des valeurs inférieures, on n'observe rien; pour $n = 37$, quelques gouttes; pour $n = 38$ ($d = 1{,}24$), faible pluie; pour $n = 39$ ($d = 1{,}25$), pluie très nette. Pour des valeurs de $n$ supérieures, pluies

(1) WILSON, *Phil. Trans.*, t. CXCII A. 1899.
(2) *Ions, Electrons, Corpuscules*, t. II, p. 1076.

de plus en plus fortes; on obtient rapidement des nuages épais, et en opérant ainsi je n'ai pas observé d'accroissement plus rapide de condensation à partir de $d = 1{,}33$,

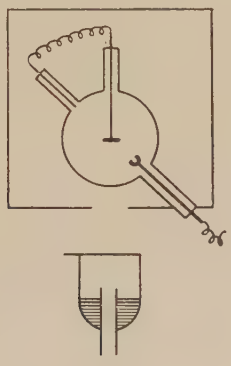

Fig. 8.

comme dans la série précédente. Les nuages sont en effet beaucoup plus denses, les intervalles de temps qui séparent deux expériences consécutives rendent les comparaisons extrêmement difficiles.

Pour les mêmes raisons, je n'ai pas pu préciser la limite supérieure du degré de détente.

Je ne retiendrai donc, de cette série d'expériences que le résultat relatif à la limite inférieure du degré de détente. Avec les rayons de Röntgen, la condensation commence un peu plus tôt que lorsque le gaz n'est pas soumis à cette action ionisante ($d = 1{,}24$), et l'on obtient plus rapidement une pluie nette qui rend moins incertaine la détermination de cette limite.

A remarquer aussi que pour faire l'étude complète dans le cas de l'air ionisé, il importe de ne pas employer une source ionisante trop forte, car les nuages ou brouillards denses obtenus peuvent très difficilement être comparés.

Quelle est l'origine des centres résiduels rencontrés dans

toutes ces expériences? Une explication plausible consisterait à admettre que les gouttes du nuage, en s'évaporant, diminuent de volume et finissent par devenir très petites et par suite imperceptibles. Ces gouttelettes joueraient le rôle de poussières liquides susceptibles de produire la condensation de la vapeur d'eau.

Les faits observés à l'aide de ces centres s'expliqueraient alors fort bien :

1° Ces poussières peuvent provoquer la condensation pour des détentes inférieures à la détente limite 1,25.

2° Il y a une relation évidente (d'après les expériences) entre le nombre des gouttes du nuage et le nombre des centres résiduels. Quand le nuage primitif est peu épais, le nuage secondaire obtenu avec les centres résiduels pour le degré de détente 1,21 est lui-même faible, et nettement plus faible que le nuage primitif. Quand le nuage ou le brouillard est épais, le nuage secondaire obtenu comme il vient d'être dit est lui-même épais et ne paraît pas différer sensiblement du nuage primitif.

Quand le nuage est peu intense, les gouttes sont plus grosses, tombent plus vite, et un certain nombre peuvent atteindre le fond de la chambre de condensation avant que l'évaporation les ait transformés en gouttes invisibles. On s'explique ainsi que le nuage secondaire obtenu avec les centres résiduels soit moins intense que le nuage primitif.

Au contraire, quand le nuage primitif est dense, les gouttes sont plus petites, tombent plus lentement et ont moins de chances d'atteindre le fond de la chambre avant leur transformation en gouttes invisibles. On conçoit alors que le nombre des centres résiduels soit sensiblement le même que celui des gouttes du nuage primitif, et qu'une détente correspondant à $d = 1{,}21$ produise un nuage secondaire sensiblement aussi dense que le nuage initial.

3° Dans le cas où le nuage initial est faible, il suffit

de deux ou trois détentes pour se débarrasser des centres résiduels, alors que si le nuage initial est intense, il faut produire un très grand nombre de détentes successives pour les éliminer complètement.

Dans le cas du nuage faible, à chaque détente un certain nombre de gouttes disparaissent au fond de la chambre, de sorte qu'à la détente suivante les gouttes sont plus grosses, tombent plus vite et ont encore plus de chances de disparaître.

Dans le cas du nuage épais, très peu de gouttes disparaissent à chaque détente par chute au fond du vase; les détentes successives donnent des nuages qui, au début, diffèrent très peu de celui qui précède et il faut multiplier les détentes pour éliminer ces centres.

Il resterait à expliquer comment il se fait que ces gouttes invisibles mettent si longtemps à s'évaporer (30 à 45 minutes), alors que les gouttes visibles deviennent si rapidement invisibles.

Dans sa théorie de la condensation, M. Langevin [1] rend compte de l'existence de ces gouttes qui sont petites et cependant très stables.

Cette théorie n'a pas été publiée, mais on en trouve les principes dans la thèse de M. E. Bloch [2] : *Sur la conductibilité électrique de l'air produite par le phosphore et sur les gaz récemment préparés*, ainsi que dans la thèse de M. Henriet [3] : *Contribution à l'étude de l'air atmosphérique.*

Ce sont ces principes que je vais indiquer, mais auparavant je rappellerai un théorème relatif au potentiel thermodynamique sur lequel repose le raisonnement.

Considérons une transformation quelconque qui consiste à faire passer un système de l'état A à l'état B,

(1) LANGEVIN, *Cours du Collège de France* (1903-1904).
(2) E. BLOCH, *Thèse de doctorat*, Paris, 1904.
(3) HENRIET, *Thèse de doctorat*, Paris, 1906.

la condition de possibilité sera

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} + S_A - S_B \leqq 0,$$

$S_A$ et $S_B$ représentant l'entropie du système correspondant aux états A et B, T étant la température absolue.

Si la transformation est irréversible, on a

$$(a) \qquad \int_A^B \frac{dQ}{T} + S_A - S_B < 0.$$

Si la transformation est réversible, on a

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} + S_A - S_B = 0.$$

Si la température est constante, c'est-à-dire si la transformation effectuée est isotherme, l'inégalité $(a)$ peut s'écrire

$$\int_A^B dQ + (S_A - S_B)T < 0,$$

ou encore

$$(b) \qquad Q_A^B + T(S_A - S_B) = -\varepsilon,$$

$\varepsilon$ étant une quantité essentiellement positive ayant les dimensions d'un travail; Q étant exprimé en unités mécaniques.

Le principe de l'équivalence donne, d'autre part,

$$Q_A^B = \mathfrak{C}_A^B + U_B - U_A.$$

L'équation $(b)$ devient alors, en groupant convenablement les termes,

$$\mathfrak{C}_A^B + U_B - TS_B - (U_A - TS_A) = -\varepsilon.$$

Posons d'une manière générale

$$U - TS = \mathfrak{F}.$$

$\mathcal{F}$ ainsi défini est appelé *énergie libre* ou *potentiel thermodynamique* à volume constant

$$\mathcal{E}_A^B + \mathcal{F}_B - \mathcal{F}_A = -\varepsilon$$

ou enfin

$$\mathcal{E}_A^B = \mathcal{F}_A - \mathcal{F}_B - \varepsilon.$$

Dans le cas particulier où la transformation est réversible $\varepsilon = 0$, et il vient

$$\mathcal{E}_A^B = \mathcal{F}_A - \mathcal{F}_B$$

ou

$$(c) \qquad \mathcal{F}_B - \mathcal{F}_A = -\mathcal{E}_A^B.$$

Conclusion. — *Pour une transformation isothermique réversible, la variation du potentiel thermodynamique d'un système est égale et de signe contraire au travail effectué par le système contre les forces extérieures.*

Si l'on provoque la détente d'une masse d'air saturée de vapeur d'eau et ionisée par les rayons de Röntgen, le degré de détente étant supérieur à 1,25, il se forme des gouttes sur ces ions qui jouent le rôle de germes. Supposons ces germes répartis uniformément dans le volume et supposons que ce dernier soit partagé en autant de parties égales qu'il y a de centres électrisés. Prenons pour faire notre étude une de ces parties contenant un seul germe, il ne se formera par suite qu'une seule goutte constituée par la vapeur d'eau sursaturante qui sera en excès immédiatement après la détente.

Considérons comme état initial celui pour lequel la détente vient de s'effectuer, la vapeur n'ayant pas encore subi un commencement de condensation; pendant la transformation le volume restera constant et l'on pourra la considérer comme adiabatique, étant donnée la rapidité de la condensation.

Prenons comme variables indépendantes le volume $v$ de la goutte et la température absolue T du système. La

condition d'équilibre à température constante et à volume constant est que le potentiel thermodynamique soit minimum.

On doit donc avoir

$$(d) \qquad \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial v} = 0,$$

$\mathcal{F}$ est le potentiel thermodynamique du système constitué par la goutte, la vapeur et d'autres gaz qui peuvent être mélangés (de l'air par exemple). Proposons-nous de calculer ce potentiel thermodynamique $\mathcal{F}$.

Désignons par $v_0$ le volume qu'occuperait la totalité de l'eau du système; la vapeur qui reste après la condensation occuperait, si elle était liquéfiée, le volume $v_0 - v$. Le potentiel thermodynamique se compose :

1° D'un terme proportionnel à la masse d'eau liquide et par suite à son volume; terme de la forme $\varphi_1 v$ ($\varphi_1$ étant le potentiel thermodynamique de l'unité de volume d'eau liquide);

2° D'un terme proportionnel à la masse de vapeur et par suite à son volume; terme de la forme $\varphi_2(v_0 - v)$ ($\varphi_2$ étant le potentiel thermodynamique de l'unité de volume d'eau à l'état de vapeur);

3° D'un terme correspondant à l'énergie superficielle de la goutte ayant pour valeur $4\pi r^2 A$, où A est la tension superficielle de la goutte et $r$ son rayon;

4° D'un terme relatif à l'énergie électrostatique de la goutte électrisée dont la valeur est très sensiblement $\frac{e^2}{2r}$, $r$ étant le rayon de la goutte;

5° D'un terme représentant le potentiel thermodynamique du gaz étranger (air par exemple) mélangé à la vapeur d'eau et qui n'est qu'une simple fonction de la température T, puisque le volume de la goutte reste très petit.

On a donc

$$\mathcal{F} = v\varphi_1 + (v_0 - v)\varphi_2 + 4\pi r^2 A + \frac{e^2}{2r} + f(T).$$

La condition d'équilibre (*d*) sera donc

$$\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial v} = \frac{\partial}{\partial v}[\varphi_1 v + (v_0 - v)\varphi_2] + \left(4\pi r^2 \frac{\partial A}{\partial r} + 8\pi r A\right)\frac{\partial r}{\partial v} - \frac{e^2}{8\pi r^4} = 0.$$

Or,

$$\frac{\partial r}{\partial v} = \frac{1}{4\pi r^2}.$$

On a donc finalement

$$(k) \qquad \frac{\partial}{\partial v}[v\varphi_1 + (v_0 - v)\varphi_2] + \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{2A}{r} - \frac{e^2}{8\pi r^4} = 0.$$

Le premier terme représente la variation du potentiel thermodynamique d'un système formé d'eau et de vapeur quand l'unité de masse d'eau passe de l'état de vapeur à l'état liquide sans changement de surface et sans électrisation.

Or, il a été établi formule (*c*) que cette variation est égale et de signe contraire au travail effectué par le système contre les forces extérieures, si la transformation est isothermique et réversible. C'est ce travail que nous allons calculer.

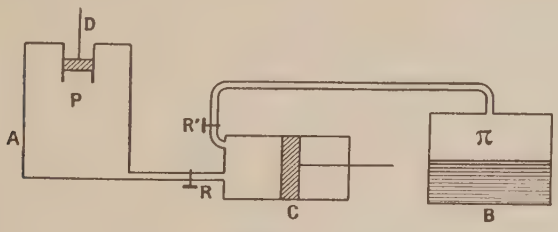


Fig. 9.

A est le récipient où s'est effectuée la détente et P est la pression de la vapeur d'eau; elle n'est pas nécessaire-

ment égale à la pression maxima $\pi$ d'équilibre entre la vapeur et une surface plane liquide. A communique avec un cylindre C dans lequel se meut un piston et ce cylindre communique lui-même avec un récipient B contenant du liquide en équilibre avec sa vapeur sous la pression $\pi$. Ouvrons le robinet R (R′ est fermé) et tirons le piston; on introduit en C une masse de vapeur qui, liquéfiée, occuperait un volume $dv$.

$\rho$ étant la densité de la vapeur sous la pression P, et $\sigma$ celle de l'eau, le volume de la vapeur sous cette pression est

$$\frac{\sigma\, dv}{\rho}.$$

Les forces du système ont travaillé et ce travail a pour valeur

$$+\frac{P\sigma\, dv}{\rho}.$$

Fermons R, la vapeur extraite de A après liquéfaction occupera un volume $dv$. Pour que le volume total reste constant, diminuons de $dv$ le volume de la vapeur restant en A en enfonçant un petit piston latéral D; les forces du système ont accompli un travail négatif dont la valeur est $-P\, dv$. Tirons le piston en arrière dans le but de faire passer la pression de P à $\pi$, on produit une détente; $p$ étant la pression à un certain instant et $u$ le volume, une détente infiniment petite $du$ est accompagnée d'un travail $p\, du$ accompli par la vapeur contre les forces extérieures. Le travail accompli est donc

$$\mathfrak{T}_1^2 = \int_{u_1}^{u_2} p\, du.$$

Or, sous le volume $u_1$ la pression est P, sous le volume $u$ la pression est $p$, la loi de Mariotte donne

$$P u_1 = p u,$$

d'où

$$p = \mathrm{P}\frac{u_1}{u}.$$

On a donc

$$\mathfrak{C}_1^2 = \mathrm{P}u_1\int_{u_1}^{u_2}\frac{du}{u} = \mathrm{P}u_1\,\mathrm{L}\frac{u_2}{u_1}.$$

La loi de Mariotte permet encore d'écrire

$$(m) \qquad \frac{u_2}{u_1} = \frac{\mathrm{P}}{\pi},$$

Donc

$$\mathfrak{C}_1^2 = \mathrm{P}u_1\,\mathrm{L}\frac{\mathrm{P}}{\pi} = \mathrm{P}\frac{\sigma\,dv}{\rho}\,\mathrm{L}\frac{\mathrm{P}}{\pi}.$$

Ouvrons le robinet R′ et poussons le piston de façon à produire la condensation de la totalité de la vapeur contenue dans le cylindre, ce qui fournira un volume d'eau égal à $dv$, La pression reste constante et égale à $\pi$ pendant toute la transformation, le volume $u_2$ de la vapeur saturante disparaît, mais en même temps apparaît le volume d'eau $dv$; la diminution de volume est donc $u_2 - dv$ et le travail effectué par le système contre les forces extérieures a pour valeur $-(u_2 - dv)\pi$.

De l'équation $(m)$ on tire

$$u_2 = u_1\frac{\mathrm{P}}{u} = \sigma\frac{dv}{\rho}\frac{\mathrm{P}}{\pi}.$$

Le travail précédent a donc pour valeur

$$-\left(\frac{\sigma\,dv}{\rho}\frac{\mathrm{P}}{\pi} - dv\right)\pi.$$

Le travail total effectué par le système contre les forces extérieures est donc

$$\mathfrak{C}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} = \frac{\mathrm{P}\sigma}{\rho}dv - \mathrm{P}\,dv + \frac{\mathrm{P}\sigma\,dv}{\rho}\,\mathrm{L}\frac{\mathrm{P}}{\pi} - \left(\frac{\sigma\,dv}{\rho}\frac{\mathrm{P}}{\pi} - dv\right)\pi$$

et, après simplifications,

$$\mathfrak{C}_A^B = \left(\frac{P\sigma}{\rho} L\frac{P}{\pi} - P + \pi\right) dv.$$

Or, d'après le principe de thermodynamique rappelé précédemment,

$$\mathfrak{F}_B - \mathfrak{F}_A = -\mathfrak{C}_A^B.$$

On a donc

$$d\mathfrak{F} = \left(-\frac{P\sigma}{\rho} L\frac{P}{\pi} + P - \pi\right) dv.$$

Il en résulte

$$\frac{\partial}{\partial v}[v\varphi_1 + (v_0 - v)\varphi_2] = -\frac{P\sigma}{\rho} L\frac{P}{\pi} + P - \pi.$$

La condition d'équilibre [équation $(k)$] devient

$$\frac{dA}{dr} + \frac{2A}{r} - \frac{e^2}{8\pi r^4} = \frac{P\sigma}{\rho} L\frac{P}{\pi} - (P - \pi).$$

1° On peut remarquer tout d'abord que cette formule permet de retrouver celle de Lord Kelvin donnant la variation de la tension de vapeur en équilibre avec une surface liquide par suite de la courbure de cette surface. En effet, pour un rayon assez grand $\frac{dA}{dr}$ sera négligeable; si, de plus, la goutte n'est pas chargée $\frac{e^2}{8\pi r^4} = 0$.

Posons

$$P - \pi = \delta\pi;$$

alors

$$P = \pi + \delta\pi \qquad \text{et} \qquad L\frac{P}{\pi} = L\left(1 + \frac{\delta\pi}{\pi}\right)$$

ou sensiblement

$$L\frac{P}{\pi} = \frac{\delta\pi}{\pi}.$$

On aura donc

$$\frac{2A}{r} = \frac{(\delta\pi + \pi)}{\rho}\sigma\frac{\delta\pi}{\pi} - \delta\pi$$

ou

$$\frac{2A}{r} = \delta\pi\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right),$$

en négligeant le terme du second ordre. Ou enfin

$$\delta\pi = \frac{2A}{r}\left(\frac{\rho}{\sigma - \rho}\right)$$

qui est la formule de Lord Kelvin.

Si la goutte est chargée, en conduisant le calcul de la même façon et en désignant par $\delta'\pi$ la différence $P - \pi$, on obtient, avec les mêmes approximations que précédemment,

$$\frac{2A}{r} - \frac{e^2}{8\pi r^4} = \frac{(\delta'\pi + \pi)\sigma}{\rho}\frac{\delta'\pi}{\pi} - \delta'\pi.$$

En négligeant les termes du second ordre, on a finalement

$$\delta'\pi = \frac{2A}{r}\frac{\rho}{\sigma - \rho} - \frac{e^2}{8\pi r^4}\frac{\rho}{\sigma - \rho}.$$

Si l'on compare cette valeur avec celle qui a été trouvée pour $\delta\pi$, on voit que l'électrisation de la goutte produit une diminution de la pression d'équilibre dont la valeur est donnée par la différence

$$\delta\pi - \delta'\pi = \frac{e^2}{8\pi r^4}\frac{\rho}{\sigma - \rho}.$$

2° Le terme $P - \pi$ est en général très petit par rapport au terme précédent et l'on pourra le négliger.

De plus, R étant la constante des gaz parfaits rapportée à 1 molécule-gramme et V le volume de la molécule-gramme de vapeur d'eau dans les conditions de l'expérience, on aura

$$PV = RT \qquad \text{et} \qquad V = \frac{M}{\rho},$$

et l'équation d'équilibre s'écrira

$$\frac{2A}{r} + \frac{dA}{dr} - \frac{e^2}{8\pi r^4} = \frac{RT\sigma}{M} L\frac{P}{\pi},$$

$r$ est l'inconnue et les racines de cette équation donnent

les rayons d'équilibre de la goutte. Pour les obtenir, il suffit de construire les deux courbes ayant $r$ pour abscisses et pour ordonnées respectivement

$$y = \frac{2A}{r} + \frac{dA}{dr} - \frac{e^2}{8\pi r^4} \qquad \text{et} \qquad z = \frac{RT\sigma}{M} L \frac{P}{\pi}$$

et de chercher les points d'intersection.

Les travaux de MM. Reinold et Rücker sur les lames minces ont montré que la tension superficielle de l'eau varie avec l'épaisseur de la lame et qu'elle est minima pour l'épaisseur qui correspond à la tache noire des bulles de savon; épaisseur dont la valeur moyenne est 12$\mu\mu$. Cette tension devient constante, mais pour des épaisseurs plus grandes.

La figure 10 rend compte de la variation de cette grandeur.

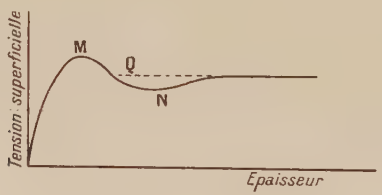


Fig. 10.

Construisons la courbe en $y$; les valeurs de $\rho$ qui annulent la fonction sont données par l'équation

$$\frac{dA}{dr} + \frac{2A}{r} = \frac{e^2}{8\pi r^4}.$$

La valeur de $y$ correspondant à la plus petite de ces valeurs est nulle; $r$ croissant, il en sera de même de $y$ qui passera par un maximum.

On vient de voir que A passe par un minimum, le terme $\frac{dA}{dr}$ devient forcément négatif, et pour une valeur assez grande de $r$, la courbe en $y$ traversera l'axe des abscisses en $r_1$, passera par un minimum et se relèvera

pour couper à nouveau cet axe au-dessus duquel elle s'élèvera pour redescendre ensuite et tendre à devenir asymptote à l'axe des abscisses. On sait en effet que, $r$ augmentant, A tend à devenir constant et $\frac{dA}{dr}$ tend vers zéro.

La courbe représentative Y a la forme indiquée par la figure 11 et se rapporte à une goutte chargée. L'ordre de grandeur de $r_1$ est de $\frac{5}{1000}$ à $\frac{6}{1000}$ de $\mu$.

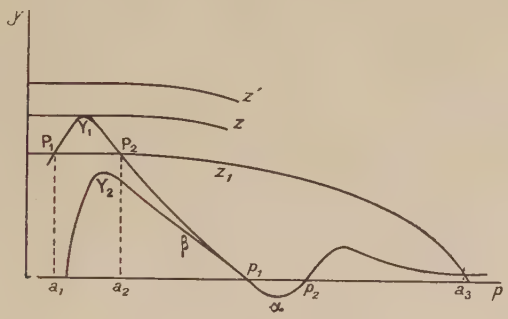


Fig. 11.

La courbe en $Y_1$ relative à une goutte non chargée ne peut différer de Y que pour des rayons très petits et, pour les valeurs de $r$ correspondantes, les valeurs de $y$ sont sensiblement plus élevées. Avec des rayons plus grands $\frac{e^2}{8\pi r^4}$ devient négligeable et les courbes se confondent.

Quant à la courbe relative à la fonction $z$, elle est représentée d'une manière générale par la ligne $z_1$. On peut admettre que la pression P de la vapeur sursaturante ne varie pas sensiblement tant que le rayon de la goutte est petit; il en résulte que le début de la courbe est une ligne droite horizontale. Ensuite la courbe se rapproche de l'axe des abscisses et coupe la courbe des $y$ pour une grande valeur de $r$; elle coupe l'axe des abscisses en un point où la vapeur devient seulement saturante.

Donc, plus la sursaturation $\frac{P}{\pi}$ sera grande, plus la courbe en $z$ sera élevée.

Si la sursaturation est relativement grande, cette courbe sera $z'$, elle ne coupera la courbe des $y$ que dans la région asymptotique à l'axe des abscisses, c'est-à-dire pour de grandes valeurs de $r$ et la condensation sera visible.

Si la sursaturation est plus faible, la partie quasi rectiligne de la courbe des $z$ coupera la courbe des $y$ en deux points $P_1$ et $P_2$ d'abscisses $a_1$ et $a_2$; l'autre point d'intersection sera beaucoup plus éloigné et aura pour abscisse $a_3$.

Le raisonnement de M. Langevin montre que les branches $\alpha$ et $\beta$ de la courbe en $y$ sont des régions d'instabilité; nous admettrons ce résultat. On en déduit que seuls les points d'intersection correspondant aux valeurs $a_1$ et $a_3$ caractérisent des états d'équilibre stable. Or, $a_1$ correspond à une valeur de $r$ très petite; si donc la sursaturation est assez faible, c'est-à-dire si la courbe des $z$ est assez basse, le rayon de la goutte partira de zéro sensiblement, s'arrêtera à la valeur $a_1$ et il n'y aura pas de condensation visible.

Une sursaturation critique est donc nécessaire pour produire une condensation visible.

Si la goutte est chargée, la théorie est analogue, mais il suffira d'une sursaturation moindre pour atteindre le sommet de la courbe et donner naissance, par conséquent, à une condensation visible.

Dans l'air ionisé, la condensation commence à se produire pour un degré de détente égal à 1,25. ce qui correspond à un degré de sursaturation égal à 4 environ. Dans l'air non ionisé, la condensation commence aussi à se produire pour cette valeur, mais elle est probablement due à la présence d'ions existant dans le gaz et c'est pour la détente 1,38 correspondant à un degré de sursaturation égal à 8 environ que le phénomène de condensation paraît

se produire indépendamment de la présence de tous germes autres que les molécules.

D'après cette théorie, 8 serait donc la sursaturation critique nécessaire pour produire la condensation visible dans l'air ne présentant ni poussières, ni germes électrisés, et 4 serait la sursaturation critique nécessaire pour produire dans l'air ionisé la condensation visible.

Cette condensation visible étant produite, si l'on provoque l'évaporation de la goutte, par exemple en comprimant le gaz, le rayon diminuera, mais pas au-dessous de $r_2$. A ce point correspond en effet une nouvelle position d'équilibre stable de la goutte en présence de la vapeur d'eau saturante, car l'instabilité des régions $\alpha$ et $\beta$ s'oppose à ce qu'elle reprenne son rayon initial $a_1$, sauf cependant dans le cas de surchauffe suffisante.

Après l'évaporation des gouttes, il reste donc de véritables gouttelettes d'un diamètre voisin de $\frac{1}{100}$ de $\mu$ qui persistent même quand la vapeur n'est plus saturante et peuvent servir de germes à une nouvelle condensation.

Dans le but de me débarrasser de ces centres résiduels, j'ai essayé une compression brusque; la chaleur développée devant produire la volatilisation des gouttes. J'ai alors construit de façon sommaire un appareil constitué par un tube de cristal (tube pour bec de gaz) mastiqué par la base à une garniture métallique fixée à l'extrémité d'un tube métallique C terminé à sa partie inférieure par une plate-forme MN s'adaptant à l'aide de trois vis de serrage sur la plate-forme qui surmonte le récipient inférieur D de l'appareil employé pour mes expériences. Dans ce cylindre se déplace en outre un piston métallique P surmonté de deux petites tiges métalliques *a*, *b*. Un peu d'eau versée dans le cylindre AB formait un joint étanche à la partie inférieure du piston P qui reposait sur une rondelle de caoutchouc.

L'intérieur du cylindre communiquait d'une part avec

le récipient D par la partie O et d'autre part avec l'air, grâce au tube T commandé par le robinet R. Le cylindre de verre AB portait à sa partie supérieure une garniture

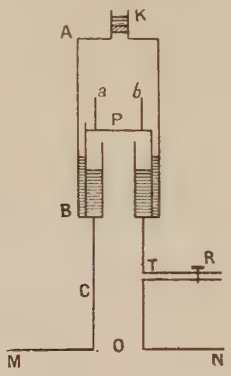


Fig. 12.

métallique portant un tube K qui tout d'abord n'était pas fermé.

Pour mettre l'appareil en expérience, on soufflait dans le tube T, le piston se soulevait et les tiges *a*, *b* venaient buter contre la rondelle de caoutchouc appliquée contre le couvercle. A ce moment, on enfonçait un bouchon dans le tube K et l'on achevait de remplir le tube avec de la cire fondue. On réalisait ainsi une bonne fermeture et l'on emprisonnait en même temps une certaine masse d'air; le robinet R était ensuite fermé et l'appareil était prêt à fonctionner par détente comme celui qui servait à mes expériences.

On laissait alors l'appareil reposer pendant un jour pour permettre aux poussières de se déposer; en ouvrant ensuite faiblement la soupape, établissant la communication avec D, on faisait descendre lentement le piston qui venait s'appliquer sur B et l'on n'observait dans ce mouvement aucune trace de condensation. Dans cette position, l'appareil était prêt à fonctionner par com-

pression. Pour cela, on mettait le récipient D en relation, non avec la trompe, mais avec un gros récipient métallique dans lequel on avait comprimé de l'air à l'aide d'une pompe de pneumatiques; en manœuvrant la soupape, on mettait brusquement ce récipient en communication avec le piston P qui était chassé vivement vers le haut et comprimait ainsi l'air emprisonné.

Pour réduire à son minimum l'ébranlement de l'appareil, résultant des chocs du piston contre le couvercle A, ce dernier venait s'appuyer par la partie supérieure contre un obstacle fixe, ce qui donnait beaucoup de solidité à l'appareil.

*Marche d'une expérience.* — Le piston P étant soulevé suffisamment en soufflant dans le tube T, on fermait le robinet R et l'on détendait brusquement la masse d'air, ce qui donnait naissance à un nuage intense, de façon à avoir des centres résiduels assez persistants. A l'aide de connexions qu'il est facile d'imaginer, on supprimait la communication avec la trompe et on l'établissait avec le réservoir à air comprimé, ce qui demandait peu de temps; en tirant sur la soupape, on comprimait brusquement la masse d'air en expérience; puis par l'intermédiaire du tube T, par aspiration, on faisait descendre lentement le piston et l'on observait encore une abondante condensation; *la compression brusque n'avait donc pas fait disparaître les centres de condensation qui existaient auparavant.*

Bien mieux, l'appareil ayant reposé 12 heures environ, on peut amener lentement le piston au haut de sa course et le ramener lentement au bas immédiatement après sans observer de condensation. Si maintenant on provoque une compression brusque et si l'on fait suivre d'une très légère détente, *on observe une forte condensation qui apparaît sous forme de pluie constituée par des gouttes relativement grosses qui tombent rapidement.*

*La seule compression brusque de l'air a donc donné naissance à un grand nombre de centres susceptibles de produire la condensation de la vapeur d'eau légèrement sursaturante.*

On ne peut par conséquent songer à employer la compression pour faire disparaître les centres résiduels, puisqu'elle donne naissance elle-même à de nouveaux centres de condensation. Ce phénomène, tout à fait inconnu à l'époque de mes premiers essais, a été signalé également par M. Barus (1), mais l'idée d'éliminer les centres résiduels par compression brusque m'est personnelle, il en est de même du dispositif employé.

Je me suis proposé alors d'essayer si un champ électrique intense n'aurait pas une action sur les centres résiduels. La plate-forme métallique a été alors disposée à l'intérieur de la chambre et reliée au sol; la plate-forme supérieure a été reliée au pôle positif d'une machine de Wimshurst tournant à grande vitesse, les pôles de cette machine étant éloignés. Le verre de la chambre constituait un mauvais isolant, et je n'ai pas pu obtenir ainsi la grande différence de potentiel que j'aurais voulu employer. Je ne parlerais pas de cet essai infructueux si je n'avais eu l'occasion d'observer, au cours de ces expériences, un phénomène qui cependant a trait aux phénomènes de condensation par détente et que je crois utile de rattacher par conséquent à l'ensemble de ce travail.

Pour des essais particuliers, la plate-forme en communication avec le sol s'est trouvée très rapprochée de la paroi de la chambre; à ce moment les pôles de la machine ayant été rapprochés, la décharge a provoqué une étincelle *microscopique* à l'intérieur de la chambre entre le plateau intérieur et la paroi. Effectuant à ce moment une détente inférieure à la valeur critique, au voisinage

(1) Barus, *The American Journal of Science*, t. XXV, 1908.

de 1,21, j'ai observé alors *une très forte condensation, sous la forme d'un brouillard épais et très persistant.*

Une étincelle presque imperceptible donne donc naissance, dans une masse d'air, à un grand nombre de centres capables de produire la condensation de la vapeur d'eau légèrement sursaturante.

L'étincelle qui avait jailli entre les pôles de la machine avait une longueur de $1^{cm},5$ environ. L'expérience a été reprise en réduisant l'étincelle qui jaillit entre les pôles; avec des étincelles de $2^{mm}$ le phénomène se produit encore et pour la détente 1,21 on obtient de très fortes condensations.

*Il n'est pas nécessaire d'ailleurs de détendre le gaz immédiatement après la production de l'étincelle;* on peut attendre une demi-minute avant d'effectuer la détente et l'on obtient encore une abondante condensation. Ayant fait jaillir entre les pôles de la machine une étincelle de $2^{cm}$, on attendait 1 minute avant de produire la détente $d = 1,21$ et l'on obtenait encore une très forte condensation. Les centres qui prennent ainsi naissance sous l'influence de l'étincelle presque imperceptible qui jaillit dans la chambre n'ont donc pas le même caractère que ceux qui sont produits par les rayons X par exemple; ils sont à rapprocher de ceux qui prennent naissance *sous l'action de l'effluve,* et qui sont étudiés dans les cours.

Ce sont probablement de gros ions ayant une faible mobilité, ce qui explique la persistance de l'effet produit; ils se comportent comme des poussières et condensent la vapeur d'eau légèrement sursaturante. Ces expériences mettent bien en évidence la faible mobilité de ces ions.

J'ai essayé ensuite l'action d'un faible champ sur l'air non soumis à l'action d'une source ionisante au moment de l'expérience; entre les plateaux métalliques de la chambre on a établi une différence de potentiel de 8 volts, et dans ces conditions on n'obtient aucune condensation

pour des valeurs de la détente comprises entre 1,25 et 1,30 ($n = 42$); pour la valeur $d = 1{,}312$ ($n = 44$), on n'obtient encore que quelques gouttes; pour des valeurs supérieures, on a des condensations de plus en plus abondantes, mais cependant plus faibles que celles obtenues sans champ.

Un faible champ a donc une action sur les centres qui provoquent la condensation, surtout sur ceux qui provoquent la condensation pour de faibles détentes. De plus, l'action du champ persiste partiellement, alors même que ce dernier a été supprimé.

Établissons d'abord le champ, puis, après l'avoir supprimé, provoquons la détente correspondant à

$$d = 1{,}312\ (n = 44),$$

on obtient alors une pluie moins forte que celle obtenue avec le même degré de détente quand on n'a pas préalablement établi le champ.

Après la suppression du champ, les centres capables de produire la condensation ne se reproduisent pas *instantanément;* il faut attendre un certain temps pour se retrouver dans les conditions normales.

Ce fait concorde avec le suivant qui a été observé par M. Rothé : « Un gaz, purifié avec soin, enfermé depuis plusieurs jours dans un récipient clos, donne naissance à un courant d'ionisation *très intense* la première fois que l'on établit le champ. Une deuxième expérience donne un courant beaucoup plus faible. En abandonnant le gaz à lui-même, au bout de 24 heures environ, on retrouve le courant intense. »

M. C.-T.-R. Wilson [1] a signalé l'action d'un champ électrique faible, agissant au moment de la détente et empêchant la formation de gouttes quand le degré de

[1] C.-T.-R. Wilson, *Phil. Mag.*, juin 1904.

détente ne dépasse pas 1,27; il est important de signaler la persistance partielle de l'action après la suppression du champ.

Il semblerait résulter d'après cela, que, pour ces *faibles détentes*, ce sont des centres électrisés, des *ions*, qui provoquent la condensation. Ces ions sont captés par le champ dans les expériences qui précèdent, et de nouveaux centres prennent naissance peu à peu dans le gaz dès que le champ a cessé d'agir.

Sous quelles actions ces ions prennent-ils naissance ? MM. A. Pochettino et H. Stella (1), qui ont étudié la conductibilité de l'air atmosphérique dans des récipients clos, ont conclu que les effets observés dans leurs expériences paraissaient s'expliquer en admettant que l'air renferme une émanation radioactive capable d'exciter, sur les parois du récipient, une activité induite temporaire.

Tous les phénomènes observés pouvaient être attribués à trois causes : 1° à l'effet de cette émanation; 2° à l'effet de radiations très pénétrantes capables de traverser la paroi des récipients; 3° à l'effet d'un rayonnement direct de cette paroi.

M. A. Vood (2) a étudié lui aussi l'ionisation spontanée de l'air en vase clos et a recherché les causes capables de produire cette ionisation. Ses expériences l'ont conduit à formuler les conclusions suivantes :

L'ionisation en vase clos a une triple origine : une partie est due à une radiation très pénétrante; une autre à la radiation secondaire des parois, et la troisième à un rayonnement propre de ces parois.

M. Campbell (3), après avoir rappelé que MM. Patterson, Mc Lennan, Strutt, Righi ont mis en lumière l'influence des parois, s'est demandé si l'ionisation de

(1) A. Pochettino et H. Stella, *Nuovo Cimento*, août 1904.
(2) A. Vood, *Phil. Mag.*, avril 1905.
(3) Campbell, *Phil. Mag.*, avril 1905.

l'air en vase clos était due uniquement à ce rayonnement des parois.

La forme des courbes relatives aux courants de saturation obtenus s'explique d'une manière satisfaisante en admettant que, dans chaque unité de volume, l'ionisation totale est la somme de trois termes : 1° d'un terme S dû à une radiation très observable émanée de l'unité de surface de la paroi; 2° d'un terme $V_1$ dû à un rayonnement pénétrant de même origine; 3° à un terme $V_2$ dû à un rayonnement très pénétrant découvert par Cooke.

La question relative à l'origine de ce rayonnement très pénétrant ne paraît pas complètement élucidée.

M. Strong [1] a étudié l'ionisation en vase clos en observant la vitesse de chute d'une feuille d'un électroscope. Quand les faces de l'électroscope, sauf la face supérieure, étaient protégées par des écrans de plomb, les variations observées ne paraissaient pas être influencées par ces écrans.

L'auteur en conclut que le rayonnement ne paraît pas provenir du sol, mais plutôt de l'atmosphère, et s'expliquerait par la présence dans l'air de produits radioactifs, en particulier du radium C.

M. Mc Lennan conclut de ses expériences que la radiation très pénétrante vient du sol et Arrhénius affirme qu'elle vient de l'univers et probablement du soleil.

M. Wulf [2] a repris la question et, d'une première série d'expériences, conclut que la plus grande partie du rayonnement vient du sol.

De nouvelles expériences, exécutées au sommet de la Tour Eiffel, dues également à M. Wulf [3], paraissent indiquer que la radiation très pénétrante a son origine,

---

(1) W. Strong, *Amér. Phys. Soc.*, 1908.

(2) Th. Wulf, *Société scientifique de Bruxelles*, 1910; *Radium*, 1910.

(3) Th. Wulf, *Phys. Zeitschr.*, 1910.

*au moins en partie,* dans des particules en suspension dans l'atmosphère.

De son étude sur les intensités relatives que présente la radiation pénétrante de l'air sur mer et sur terre, M. Mc Lennan conclut que l'ionisation est plus faible sur une vaste étendue d'eau que sur la terre ferme, et que la source de la radiation pénétrante doit être recherchée dans le sol même et non dans l'atmosphère terrestre ou dans le ciel.

Enfin, MM. Simpson et Wright (1), en étudiant l'ionisation en vase clos en vue de déceler la présence ou l'absence de la radiation pénétrante au-dessus de la mer, arrivent à cette conclusion que l'ionisation naturelle à l'intérieur du récipient provient d'une émission spontanée d'électrons par quelques molécules de gaz, de la même manière qu'en émettent les molécules de rubidium et de potassium, mais en quantité bien moindre. Pour ces expérimentateurs, l'ionisation spontanée serait une propriété générale, mais pouvant intéresser un nombre plus ou moins grand de molécules.

Si l'on admet l'existence de la radiation pénétrante, quelle que soit son origine, c'est elle qui serait la principale cause d'ionisation de l'air en vase clos, et, au début, pour des détentes inférieures à 1,30, ce sont ces centres électrisés qui provoquent la condensation de la vapeur d'eau. La condensation pour des détentes supérieures s'explique en admettant avec M. Barus (2) qu'il existe dans l'air, même filtré sur du coton, de petits noyaux qui ne seraient que des molécules d'air colloïdales. Une détente ou un rayonnement extérieur suffirait à amener la floculation de ce colloïde dont les particules agglomérées deviendraient alors l'équivalent de poussières. Il faudrait

(1) Simpson et Wright, *Proc. Roy. Soc.*, 1911; *Radium*, janvier 1912.
(2) C. Barus, *Radium*, janvier 1906 (Résumé de M. L. Bloch).

supposer que, dans les conditions normales, il règne entre l'air et les noyaux qu'il renferme un véritable équilibre chimique.

Toutefois, cette manière de voir n'expliquerait pas la coïncidence entre le degré de détente observé 1,33 pour lequel j'ai observé un accroissement de condensation quand le gaz n'est pas ionisé et le degré de détente 1,33 pour lequel les ions positifs commencent à donner des brouillards relativement épais, ce qui semblerait indiquer une certaine corrélation entre les deux phénomènes.

Avec d'autres gaz, j'ai été conduit à faire des rapprochements du même genre, entre ce qui a été observé sans ionisation et avec ionisation préalable; le raisonnement de M. Barus, d'après lequel les centres de condensation ne sont pas chargés, ne paraît pas rendre compte des coïncidences observées. Il n'expliquerait pas non plus, qu'avec un faible champ, pour des détentes un peu élevées, la condensation est moins forte que sans champ.

Dans les expériences effectuées avec ionisation préalable par rayons X, les nuages obtenus deviennent rapidement intenses, la nécessité de faire disparaître les centres résiduels oblige à attendre un temps relativement long pour effectuer une deuxième expérience et la comparaison des nuages ainsi obtenus est bien difficile; aussi avant de passer à l'étude de la dissymétrie, j'ai essayé de réaliser une méthode d'inscription photographique permettant de fixer l'apparence du nuage observé. On voit que les difficultés rencontrées au cours des essais précédents rendaient l'emploi de cette méthode absolument nécessaire.

## CHAPITRE V.

### Emploi d'une méthode photographique.

Le nuage est éclairé par l'arc électrique alimenté par un courant de 22 ampères et projeté à l'aide d'une lentille de $30^{cm}$ de distance focale placée à $60^{cm}$ de la source de façon à obtenir en vraie grandeur l'image du cratère à l'intérieur de la chambre de condensation. Une cuve d'alun est interposée sur le trajet du faisceau afin d'absorber la majeure partie de la chaleur.

On observe à l'aide d'un microscope peu grossissant, permettant de viser à une distance de $2^{cm},5$ de l'objectif.

Ce microscope est disposé horizontalement à peu près au milieu de la distance séparant les deux plateaux métalliques de la chambre de condensation; il est orienté de façon à faire un angle d'environ $40^{o}$ avec l'axe du faisceau éclairant. En somme, on a ainsi un éclairage latéral et l'observation se fait sur fond sombre. Les gouttes, vivement éclairées, se détachent nettement sur ce fond et se présentent souvent sous forme de petites lignes brillantes.

Dans le cas où le nuage est peu épais, les gouttes, qui ne sont au point que d'une façon imparfaite, fournissent des taches plus ou moins brillantes d'apparence circulaire et empiétant les unes sur les autres. Le mouvement des gouttes s'observe sur le verre dépoli d'une chambre photographique. La rapidité de ce mouvement exige l'emploi de poses très courtes, $\frac{1}{50}$ de seconde environ, et de plaques extra-rapides. Malgré cela, les gouttes ne paraissent pas toujours parfaitement immobiles.

Les phénomènes de condensation étudiés présentent des perturbations au voisinage des parois de la chambre dues à des mouvements de convection. Pour cette raison,

on observe dans un plan situé à une distance d'environ $1^{cm}$ en arrière de la paroi.

Ce dispositif ne convient pas pour observer de faibles pluies, car alors il n'y a pas toujours des gouttes au point dans le champ de l'appareil; de plus, le nuage n'étant pas homogène, on peut obtenir des photographies différentes pour un même degré de détente.

Dès que le nuage devient un peu intense, il est plus homogène; il y a toujours des gouttes au point et alors on peut comparer les photographies obtenues.

La méthode d'enregistrement photographique devient donc surtout avantageuse à partir du moment où l'observation directe devient difficile. Comme je me propose surtout de la faire servir à l'étude de la dissymétrie et que, sous l'action des rayons de Röntgen, on a rapidement de forts nuages, elle répond bien au but que je me suis proposé.

Tout d'abord, le faisceau éclairant pénétrait dans la chambre de condensation pendant toute la durée des expériences; de cette façon le verre de la paroi au voisinage du microscope était chauffé, ce qui empêchait la formation de la buée à cet endroit, condition nécessaire pour obtenir de bonnes photographies.

Mais l'échauffement de la masse gazeuse contenue dans la chambre produisait des mouvements de convection préjudiciables à une bonne observation ou encore favorisait un évanouissement anormal des gouttes. C'est pour éviter ces perturbations qu'un obturateur fut disposé sur le trajet du faisceau éclairant, permettant l'éclairage de la chambre une demi-seconde environ avant d'effectuer la détente.

Seulement, dans ces conditions, les parois intérieures se recouvrent rapidement de buée que l'on fait disparaître au commencement de chaque expérience en y appliquant extérieurement une étoffe chaude.

Les plaques employées sont des plaques ultra-sensibles de la maison Lumière (étiquette violette).

Il n'est pas toujours facile de photographier des images qui paraissent cependant assez bien éclairées sur le verre dépoli de l'appareil, quand le temps de pose doit être très court. C'est ainsi qu'au début de mes expériences, les plaques photographiques, traitées par un développeteur ordinaire, ne présentaient aucune trace d'impression, même pour des temps de pose de l'ordre de $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{5}$ de seconde, bien supérieurs par conséquent à ceux qui sont nécessités par ce genre d'expériences.

Ayant utilisé les plaques les plus sensibles, j'ai donc cherché à améliorer la méthode en étudiant divers révélateurs. La comparaison de photographies prises dans des conditions identiques, mais développées avec des révélateurs différents, a montré qu'il fallait s'adresser à un révélateur énergique. J'ai fixé mon choix sur le paramidophénol avec lithine caustique.

On peut ainsi développer une plaque en un temps qui varie de 1 à 3 minutes et utiliser des temps de pose de l'ordre du $\frac{1}{50}$ de seconde environ.

La détente produisant de violents remous, on attend la fin de cette perturbation pour photographier, car le nuage ou la pluie est alors plus homogène et les gouttes se déplacent moins rapidement.

Au cours de mes expériences, j'ai été amené à prendre plus de 200 photographies; je ne reproduirai ici que les plus essentielles.

## CHAPITRE VI.

### Expériences relatives à la dissymétrie.

Le dispositif était analogue à celui employé par M. Wilson dans ses premières expériences sur la dissymétrie. Le tube focus, enfermé dans une boîte doublée

de feuilles de plomb, était disposé comme l'indique la figure. La partie de la boîte faisant face à l'anticathode présentait une fente horizontale de $3^{mm}$ de large et était renforcée de plusieurs épaisseurs de plomb au voisinage de la fente de façon à mieux délimiter un faisceau horizontal de rayons X. Un champ électrique pouvait être établi entre les deux plateaux métalliques de la chambre,

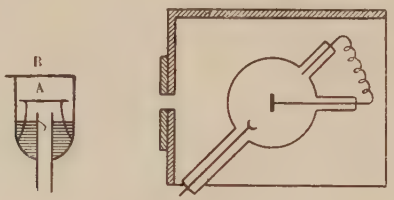


Fig. 13.

et un inverseur permettait de changer à volonté le sens de ce champ.

Le faisceau étroit de rayons X rase la plate-forme métallique inférieure, et lorsque le champ électrique est dirigé de A vers B, les ions négatifs sont captés par A et les ions positifs sont captés par B. Comme la région ionisée est très voisine de A, les ions négatifs ont peu de chemin à faire pour rencontrer A et sont rapidement captés; il n'en est pas de même des ions positifs, et dans l'intervalle compris entre les plateaux, il y a excès d'ions positifs. C'est le contraire qui a lieu quand le champ électrique est dirigé en sens inverse. On peut donc ainsi faire prédominer à volonté les ions positifs ou négatifs. Sans champ, l'air ayant été soumis pendant 2 secondes à l'action des rayons de Röntgen, pour une détente égale à 1,258 ($n = 40$), il se produit un nuage épais. Un champ de 4 volts par $3^{cm},5$ modifie sensiblement l'aspect du nuage qui est moins dense, mais le changement de sens de ce champ conduit à des résultats variables qui ne font pas apparaître la dissymétrie.

Avec un champ de 110 volts, le nuage est considérablement réduit, mais la dissymétrie n'apparaît toujours pas.

Je me suis demandé alors si je me trouvais bien dans les conditions voulues, savoir : faisceau mince, presque linéaire, rasant le plateau métallique inférieur.

Dans le but d'obtenir un faisceau horizontal de rayons X encore mieux limité, j'ai interposé, entre la chambre de condensation et la caisse, un écran formé de deux lamelles de plomb de $4^{mm}$ d'épaisseur, placées dans le prolongement l'une de l'autre et laissant entre elles un intervalle de $2^{mm}$.

La fente de l'écran et la fente pratiquée dans la paroi de la caisse sont dans le plan du plateau métallique qui se trouve dans la chambre de condensation et, en apparence du moins, on se trouve dans les conditions requises.

La présence de cet écran ne paraît pas modifier sensiblement l'intensité du nuage observé sans champ, pour un degré de détente correspondant à $d = 1{,}258$ ($n = 40$).

Si l'on ferme la fente à l'aide d'une plaque de plomb épaisse, il y a certainement une diminution de l'intensité du nuage, mais on observe encore une forte condensation.

L'écran interposé entre la chambre de condensation et la caisse a été ensuite modifié et remplacé par un autre, agencé de la même façon et obtenu en superposant une nouvelle feuille de plomb de $4^{mm}$, ce qui fait une épaisseur totale de $8^{mm}$ présentant toujours une fente de $2^{mm}$ de largeur. Le tube a été ensuite reculé et, pour le même degré de détente, le nuage obtenu sans champ est moins accentué que le précédent; la fente ayant ensuite été fermée à l'aide d'une lame de plomb de $16^{mm}$ d'épaisseur, la condensation obtenue pour la même détente est un peu plus faible, mais la différence n'est pas très grande.

Ces phénomènes pourraient s'expliquer en admettant que le tube focus employé émet, en même temps que des

rayons X, des radiations très pénétrantes. La condensation osbervée dans les expériences précédentes serait due surtout à ces radiations très pénétrantes qui auraient traversé les écrans interposés, plutôt qu'à l'action des rayons X qui passaient à travers la fente.

Les faits que je viens de signaler et l'explication possible émise, cadrent avec des expériences de M. Barus (1). « Ce savant a signalé que la production de noyaux de condensation s'est montrée sensiblement constante quand la distance varie de $6^{cm}$ à $6^{m}$, alors que la loi de l'inverse proportionnalité au carré de la distance laissait prévoir une réduction au $\frac{1}{10000}$, ce qui tendrait à établir que le tube employé émettait lui aussi des radiations extraordinairement pénétrantes, et que c'est plus particulièrement sous l'action de ces radiations que prennent naissance les centres de condensation observés dans les expériences de M. Barus. Sous ce rapport, ces radiations se rapprochent des rayons $\gamma$ du radium, et diffèrent nettement des rayons X ordinaires.

» *Cette impression s'accentue du fait que l'action n'est pas arrêtée par des écrans de plomb de plusieurs centimètres d'épaisseur, placés entre le tube et la chambre de détente.*

» Avec des écrans de plomb de quelques millimètres d'épaisseur, l'action est réduite à un minimum qu'on ne peut ensuite diminuer, même par l'interposition de plusieurs centimètres de plomb. »

Le résultat des expériences personnelles que je viens de décrire a beaucoup d'analogie avec celui des expériences de M. Barus et il était assez naturel de penser à les expliquer d'une manière analogue.

Ce n'est pas d'ailleurs la seule explication plausible; on pourrait aussi penser à un rayonnement émanant du

(1) *Radium*, 1906 (Résumé des expériences de M. Barus, par M. L. Bloch).

tube, qui contournerait les écrans, ce qui expliquerait pourquoi l'épaisseur de l'écran interposé et l'épaisseur de l'écran qui ferme la fente ne paraissent pas avoir d'influence. En particulier, on pourrait se demander si le tube n'est pas le siège d'oscillations électriques donnant naissance à des ondes qui viendraient agir sur le gaz de la chambre de condensation. Il ne semble pas que cette hypothèse puisse être retenue, car un appareil oscillant ayant été installé à proximité de la chambre de détente n'a donné naissance à aucune condensation.

Quoi qu'il en soit, l'existence de ces radiations parasites autres que les rayons X, et qui se produisent en même temps que ces derniers, m'a conduit à étudier leur action sur l'écran fluorescent et la plaque photographique.

*Action sur l'écran fluorescent.* — L'écran est déplacé de la caisse à l'écran de plomb; au voisinage de la caisse, il y a production d'une bande fluorescente étroite, brillante, bien délimitée. En reculant l'écran fluorescent, la bande devient de plus en plus large, moins bien délimitée et son éclat diminue rapidement. Entre l'écran de

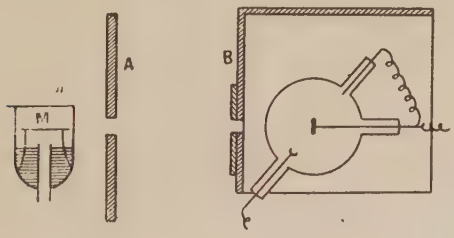


Fig. 14.

plomb et la chambre de condensation, on ne distingue rien; le mince faisceau de rayons X qui passe à travers l'écran A ne produit pas de fluorescence appréciable. A aucun moment l'écran n'est apparu fluorescent dans

les régions autres que celles frappées par les rayons de Röntgen.

Les radiations parasites ont été sans action sur l'écran fluorescent.

*Action sur la plaque photographique.* — La plaque, entourée d'une feuille de papier noir, était placée d'abord au milieu de la distance qui sépare l'écran A de la paroi B de la caisse, c'est-à-dire à $8^{cm}$ de B, on obtient en face de la fente pratiquée dans la caisse une bande noire assez intense dont les bords ne sont pas nettement arrêtés.

Une deuxième plaque était placée ensuite près de l'écran de plomb A du côté de B, c'est-à-dire à $16^{cm}$ de la caisse, on obtenait une bande plus large, beaucoup moins intense, à bords mal définis, visible difficilement par transparence, mais que l'on distingue assez bien en regardant la plaque au-dessus d'une feuille de papier blanc.

Une troisième expérience était faite en plaçant la plaque près de l'écran de plomb A, mais du côté de la chambre de condensation; en regardant la plaque au-dessus d'une feuille de papier blanc, on observait un trait extrêmement ténu, visible à grand'peine analogue à un cheveu extrêmement fin. Le temps de pose pour chacune de ces expériences était de 10 secondes.

Cette dernière était reprise dans les mêmes conditions, mais avec un temps de pose égal à 1 minute et demie, et l'on obtenait alors un trait très net analogue à un trait au crayon.

Il résulte de ces expériences que la plaque est seulement attaquée par les radiations qui passent à travers les fentes, et que l'énergie de ces radiations va *en décroissant très rapidement avec la distance.* Quant aux radiations parasites, elles sont sans action sur la plaque photographique.

La dernière photographie montre également que par la fente de A passe un faisceau de rayons X très mince, linéaire, et si l'on pouvait arrêter les radiations parasites, *dans les expériences précédentes*, on se trouverait dans des conditions convenables pour réaliser l'expérience de M. Wilson.

Dans le but d'étudier une dernière fois l'action d'écrans interposés, un deuxième écran de plomb de $12^{mm}$ d'épaisseur fut disposé entre le premier écran et la caisse contenant le tube; une fente de $2^{mm}$ de largeur, en regard des deux autres livrait passage aux radiations. Le premier écran fut en outre renforcé d'une lame de plomb de $4^{mm}$ d'épaisseur; l'épaisseur totale des deux écrans était alors $24^{mm}$.

Dans ces conditions, l'ionisation était moins intense qu'auparavant, mais toujours très forte. Quand on fermait l'une des fentes avec une lame de plomb épaisse, la condensation était un peu plus faible, mais toujours importante.

La chambre de condensation n'est donc pas protégée par ces écrans, contre les radiations parasites émanant du tube.

Dans les expériences de M. Wilson, on s'était surtout préoccupé de protéger la partie de la chambre de condensation comprise entre les plateaux, en disposant un écran de plomb épais dont le bord inférieur était un peu au-dessus de la plate-forme métallique inférieure, l'*anticathode était disposée presque horizontalement au niveau de la surface supérieure du plateau inférieur de sorte que la ource effective des rayons qui entraient dans la fente était presque linéaire. De cette façon, il ne se trouve qu'une mince couche d'air près de la surface du plateau inférieur exposée à l'action directe du foyer.*

Il semble que, dans l'esprit de l'auteur, le faisceau de rayons X était limité à la partie inférieure par le plan de l'anticathode, d'où l'inutilité d'un écran métallique pour

couvrir la partie inférieure de la chambre. Dans le but de vérifier s'il en était bien ainsi, j'ai réalisé la série des expériences suivantes :

Les deux écrans de plomb dont j'ai parlé précédemment protégeaient la chambre de condensation, les distances de ces écrans entre eux et à la chambre de condensation sont indiquées sur la figure. Le tube focus était sorti de sa caisse, et disposé à $20^{cm}$ en arrière du second écran de façon que son anticathode soit horizontale. Dans une première expérience, le plan M de l'anticathode est en contre-bas du plan du plateau métallique inférieur K, à

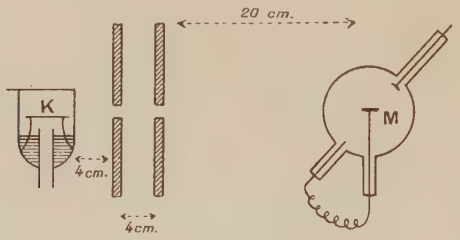


Fig. 15.

une distance de $10^{cm}$; dans la seconde, le plan de l'anticathode est sensiblement sur le niveau de K; dans la troisième, le plan de l'anticathode est au-dessus du plan du plateau K à une distance de $14^{cm}$. Toute la chambre est au-dessous de M.

Si l'ionisation était due aux seuls rayons X, et si ces rayons étaient limités par le plan de l'anticathode, elle devrait être nulle dans ce dernier cas; or les nuages obtenus dans ces trois cas ont sensiblement la même intensité comme l'indiquent les photographies [valeur de la détente $d = 1{,}258$ $(n = 40)$].

*Conclusion.* — Dans les expériences de M. Wilson citées précédemment, la disposition du tube n'empêche pas certaines radiations de pénétrer au-dessous du plateau

métallique inférieur et peut-être même dans l'intervalle des deux plateaux, si les radiations émises ne sont pas des rayons pénétrants analogues à ceux de M. Barus, mais sont constitués par un rayonnement capable de contourner les obstacles. Le plan de l'anticathode ne limite pas les radiations capables de produire l'ionisation.

J'étais ainsi naturellement conduit à étudier les radiations pouvant provenir de la partie du tube située en arrière de l'anticathode.

L'écran au platinocyanure de baryum n'est pas impressionné; la plaque photographique décèle la présence de rayons X peu énergiques. Elle était protégée par une feuille de papier noir et placée parallèlement à l'anticathode, en arrière de cette dernière et à une distance de $20^{cm}$. Sur la feuille de papier noir on avait placé, vers le milieu, une lamelle de plomb de petites dimensions et de $2^{mm}$ d'épaisseur, le tube a été actionné pendant 30 secondes. On a obtenu ainsi un négatif qui, regardé au-dessus d'une feuille de papier blanc, indique une légère attaque autour de la lamelle de plomb.

Le tube émet donc dans cette partie, des rayons X très peu énergiques. L'expérience a été reprise en plaçant la plaque dans les mêmes conditions, mais en avant de l'anticathode; la pose était la même; l'attaque observée a été très énergique. Sous la lame de plomb, la plaque n'a pas été impressionnée et présente une partie claire bordée de bandes très noires. La comparaison de ces photographies montre la différence qu'il y a au point de vue de l'énergie entre les rayons X provenant de l'une ou l'autre des deux moitiés du tube séparées par le plan de l'anticathode.

Puisque la moitié du tube focus en arrière de l'anticathode est capable d'émettre des rayons X comme l'autre moitié, mais en quantité beaucoup moindre, en admettant l'hypothèse des radiations pénétrantes, on

doit se demander si, de cette mauvaise moitié du tube, partent aussi de telles radiations.

D'où l'expérience suivante analogue à celles qui correspondent à la figure 15. Le tube a été placé de telle sorte que le plan M de l'anticathode étant vertical, la moitié du tube déterminée par ce plan et située en arrière de l'anticathode soit du côté de la chambre de condensation. Toutes les autres conditions expérimentales restant les mêmes, on a obtenu une condensation qui, quoique moins forte, est encore très sensible. Ce résultat s'accorde encore bien avec ceux obtenus par M. Barus [1] dans les expériences citées précédemment. Ce savant avait en effet constaté que : « *l'action de ces radiations pénétrantes s'observait aussi bien en arrière qu'en avant de l'anticathode* ».

La soupape de mon appareil ayant cessé de fonctionner, et une rentrée d'air s'étant produite, il ne m'a pas été possible de prendre une photographie pouvant être comparée aux précédentes.

Le nuage obtenu en dernier lieu était moins intense que ceux qui se rapportaient aux trois expériences utilisant le dispositif de la figure 15 ; il semble bien que la forte condensation obtenue dans le cas où le plan horizontal de l'anticathode est très nettement au-dessus du plan commun aux fentes des écrans ne puisse pas être attribuée uniquement aux radiations émanant de la moitié la moins active du tube.

En envisageant l'hypothèse des radiations pénétrantes, l'action pourrait provenir de la moitié la plus active du tube émettant de telles radiations et qui subiraient une forte dispersion, c'est-à-dire qui ne s'échapperaient pas normalement à la surface extérieure.

D'expériences ultérieures que je détaillerai par la suite,

---

[1] C. Barus, *Radium*, janvier 1906 (Résumé par M. L. Bloch).

il résulte que, de la moitié la plus active du tube, s'échappent des rayons X présentant une dispersion de ce genre, il serait donc assez naturel de l'admettre aussi pour les rayons pénétrants si l'on admet, avec M. Barus, la coexistence de ces rayons avec les rayons X.

Peut-être aussi pourrait-on considérer l'ionisation observée dans ces expériences et dans toutes celles où l'on a observé l'action des rayons parasites comme due à des *actions secondaires* produites par l'action des rayons X sur les écrans de plomb.

Enfin, en considérant l'hypothèse d'un rayonnement qui contournerait les obstacles, on expliquerait ces résultats comme on a déjà expliqué antérieurement des faits du même genre.

Quelle que soit d'ailleurs l'origine de ces rayons parasites, leur présence ne peut que nuire à la bonne marche d'une expérience relative à la dissymétrie.

En effet : *Tout l'intervalle compris entre les plateaux de la chambre de condensation est ionisé quel que soit le sens du champ; par raison de symétrie, les ions négatifs par exemple ne seront pas captés plus facilement. L'inversion du champ ne modifiera pas le nombre d'ions négatifs restant, et il en sera de même pour les ions positifs. Le nombre d'ions tant positifs que négatifs qui se trouvera entre les plateaux sera toujours à peu près le même, indépendant du sens du champ.*

Les nuages provenant de ces centres seront donc sensiblement identiques; en se mélangeant avec ceux provenant de centres produits par les rayons X ayant rasé le plateau métallique inférieur, ils tendront à masquer la dissymétrie qui devrait alors se manifester sur ces derniers centres.

Il conviendrait donc d'éliminer ces rayons parasites, et alors on serait dans de bonnes conditions pour réaliser les expériences de dissymétrie.

## CHAPITRE VII.

### Étude de la dissymétrie en utilisant un tube de Crookes.

Pensant qu'un tel tube, qui émet lui aussi des rayons X, donnerait moins de rayons parasites, je me suis tout d'abord proposé d'étudier la dissymétrie avec un tube de Crookes. Le dispositif employé était celui de la figure 15 le tube de Crookes remplaçant le tube focus; on observe encore une certaine ionisation, mais bien moins forte qu'avec le tube précédent. Quand la fente à travers laquelle passent les rayons X est fermée, la condensation observée est un peu plus faible que lorsque la fente est ouverte, mais pas beaucoup plus pour le même degré de détente. Ce tube émet lui aussi des rayons parasites, mais en moindre quantité que le tube focus.

Si l'on approche un peu le tube, on n'observe pas de variation bien sensible, cependant la condensation paraît augmenter un peu (pour le même degré de détente). Ceci peut s'expliquer de la façon suivante : l'effet des radiations parasites est peu sensible à l'action de la distance, alors que les rayons X y sont au contraire très sensibles, comme j'ai eu l'occasion de le dire précédemment.

Aux distances utilisées dans l'expérience, les rayons X se font peu sentir et le phénomène de condensation est dû à peu près uniquement aux radiations parasites. Le faisceau de rayons X est très mince et la source trop éloignée.

D'après cela, en rapprochant le tube de Crookes, on augmentera surtout l'énergie des rayons X, et si le champ électrique agit sur les ions produits par ces rayons, peut-être sera-t-il possible de saisir, d'après l'aspect général du phénomène de condensation, la manifestation de cette action. Pour pouvoir rapprocher davantage le tube de Crookes, l'un des écrans, le second, a été sup-

primé. Un champ de 4 volts par $3^{cm},5$ a été établi entre les plateaux, et un inverseur permettait de changer le sens de ce champ. *Par observation directe, il semblait que*

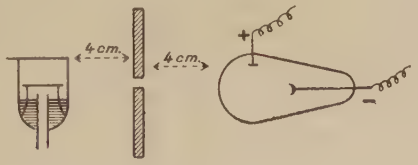


Fig. 16.

*l'aspect des nuages obtenus pour un même degré de détente variait avec le sens du champ*; autrement dit, la dissymétrie semblait se manifester dans ces expériences. Pour préciser, j'ai appliqué la *méthode photographique.* Deux séries de six photographies ont été prises en faisant alterner le sens du champ de façon à avoir en excès tantôt les ions négatifs, tantôt les ions positifs. Si les ions négatifs ont une faculté de condensation supérieure à

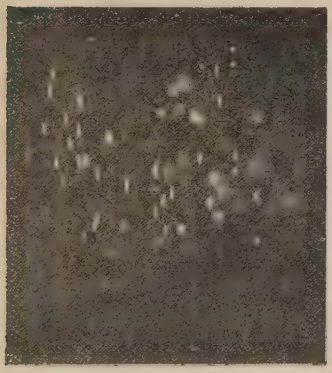

Fig. 17. — Ions négatifs en excès.

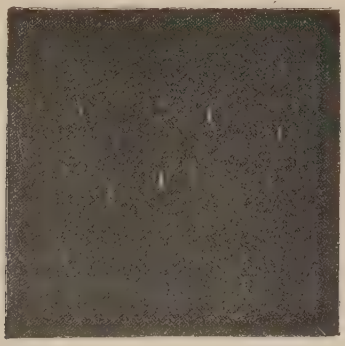

Fig. 18. — Ions positifs en excès.

celle des ions positifs, on devra avoir plus de points sur les photographies prises dans le cas où les ions négatifs sont en excès. C'est ce que l'on a observé, sauf pourtant

dans deux cas pour lesquels il y a incertitude. Les photographies (17) et (18) montrent cette dissymétrie.

Il faut d'ailleurs s'attendre à avoir des résultats qui ne sont pas toujours concordants, et cela pour diverses raisons dont voici les principales : Les gouttes ne sont pas réparties uniformément, surtout quand le nuage n'est pas bien épais, et il se produit des remous dans la masse de gaz. Il peut donc se faire que dans le cas où l'on a affaire à un nuage moins intense (ions positifs en excès), on photographie justement la partie la plus dense du nuage et qu'au contraire, dans le cas où l'on a affaire à un nuage plus intense (ions négatifs en excès), on photographie la partie la moins dense du nuage; dans ce cas, les photographies peuvent être à peu près équivalentes. Mais on peut néanmoins conclure à l'existence de la dissymétrie, si elle se manifeste dans la très grande majorité des cas, c'est ce que l'on a observé dans les expériences précédentes.

De nouvelles expériences ont été entreprises dans le but de rechercher si l'action du champ se fait plus spécialement sentir sur les ions produits par les rayons X qui passent par la fente ou sur les ions produits par les rayons parasites.

*Première expérience.* — Les deux plateaux sont réunis par un fil, c'est-à-dire sont portés au même potentiel, et l'air n'est pas soumis à l'action des rayons X; on provoque la détente et l'on photographie 2 secondes après. Le cliché ne porte pas trace de points.

*Deuxième expérience.* — La différence de potentiel entre les plateaux est encore nulle; la fente *est ouverte* et la chambre est exposée à l'action des rayons pendant 2 secondes; on photographie 2 secondes après la détente. Le cliché indique une forte condensation et son observation permet de se rendre compte de l'action ionisante des

rayons parasites et des rayons X qui passent à travers la fente.

*Troisième expérience.* — La différence de potentiel entre les plateaux est toujours nulle, la fente *est fermée* par une plaque de plomb et la chambre est exposée à l'action des rayons pendant 2 secondes; on photographie 2 secondes après la détente; le cliché ne porte pas trace de points.

La comparaison entre ce résultat et le précédent montre que les gouttes observées dans la seconde expérience *sont dues à l'action ionisante des rayons* X *qui ont traversé la fente* et que, par suite, *toute modification apportée par le champ dans les phénomènes de condensation, correspond à une action de ce champ sur les ions produits par des rayons* X *qui ont traversé la fente.*

Je me trouve bien dans les conditions requises pour réaliser l'expérience de M. Wilson, faisceau mince rasant le plateau métallique inférieur, et par conséquent la *dissymétrie observée dans les expériences précédentes se rapporte bien à l'action du champ sur les ions produits par ces rayons* X.

D'autres expériences ont été ensuite entreprises dans le but d'étudier l'action du champ sur les ions produits par les seuls rayons parasites. Une plaque de plomb fermait la fente et arrêtait les rayons X, une différence de potentiel de 4 volts était établie entre les plateaux métalliques. Puisque, d'après la troisième expérience de la série précédente, il n'y a rien sur la plaque quand on photographie après détente, fente fermée et *sans champ, à fortiori* il ne doit rien y avoir quand, toutes les autres conditions restant les mêmes, on crée un champ de 4 volts entre les plateaux métalliques. C'est ce qui a été vérifié, cela quel que soit le sens du champ. *Ainsi, 2 secondes après la détente, il est trop tard pour étudier l'effet du champ sur les rayons parasites.*

Une nouvelle série de photographies a été prise dans les mêmes conditions, avec cette différence que l'on photographiait une seconde seulement après la détente. Le champ était d'abord dirigé de haut en bas et sa direction changeait à chaque expérience. Il n'y a rien sur les photographies ou seulement deux ou trois points.

Conclusion. — *Une seconde après la détente, il est trop tard pour observer les phénomènes de condensation qui se produisent sur les ions provenant des rayons parasites.*

Il est d'ailleurs inutile de chercher à réduire l'intervalle de temps qui sépare la détente de l'instant où l'on déclanche l'obturateur de l'appareil photographique. En effet : l'air de la chambre ayant été soumis à l'action ionisante pendant 3 secondes, on photographiait le nuage obtenu une demi-seconde après la détente, le champ étant nul pour avoir plus de points; l'aspect des photographies indique qu'à ce moment l'air est violemment agité. L'une d'elles est plus particulièrement caractéristique : les gouttes en mouvement ont tracé des traits presque horizontaux, et la longueur de ces traits indique que ces gouttes se déplacent rapidement. D'autre part, les résultats obtenus sont assez variables et vérifient bien ce que j'ai déjà annoncé, savoir que dans le cas où les nuages sont peu intenses, par suite du manque d'homogénéité, on peut obtenir des photographies différant sensiblement les unes des autres, quoique prises dans les mêmes conditions expérimentales. Ceci rend parfois l'application de la méthode photographique assez délicate.

De ces expériences, il résulte que 2 secondes, et même 1 seconde après la détente, on ne peut observer aucun phénomène de condensation provenant des ions relatifs aux rayons parasites quand on a établi un champ de 4 volts entre les plateaux métalliques, et cela quel que soit le sens du champ.

Cette vérification expérimentale concorde avec la conclusion énoncée précédemment et que je rappelle ici : *Toute modification apportée par le champ dans les phénomènes de condensation, observés fente ouverte, correspond à une action de ce champ sur les ions produits par les rayons* X *qui ont traversé la fente.*

Cela à condition d'observer le nuage au moins 1 seconde après la détente, ce qui a lieu dans mes expériences. Ces résultats établissent encore que l'ionisation produite par les rayons parasites est faible, ce qui revient à dire que le tube de Crookes employé émettait relativement peu de ces rayons, c'est justement ce qui a permis de pouvoir faire prédominer l'action des rayons X.

Enfin, ces expériences montrent que l'action du champ (au point de vue du sens) sur les ions produits par les radiations parasites n'a pas pu être faite, puisque, moins de 1 seconde après la détente, l'air est encore dans un état d'agitation nuisible à une observation correcte, surtout quand on se trouve en présence de nuages peu intenses qui ne sont pas homogènes.

L'écran interposé entre le tube et la chambre de condensation a été ensuite supprimé; l'action des rayons X en particulier a été considérablement augmentée, aussi la condensation observée a-t-elle été beaucoup plus forte. Deux photographies ont été prises dans les conditions suivantes : le champ entre les plateaux était nul, la chambre restait exposée 2 secondes aux radiations et l'on photographiait 2 secondes après la détente. On obtenait alors des brouillards formés de gouttes très fines, l'aspect des photographies ainsi obtenues contraste avec celui des précédentes.

Pour terminer cette étude, j'ai pris quelques photographies de nuages obtenus en établissant un champ entre les plateaux métalliques, l'écran était également supprimé et l'on changeait le sens du champ à chaque expérience.

Un champ de quelques volts ne produit aucune action sensible. Avec 110 volts on obtient encore une forte condensation, mais ce n'est cependant plus le brouillard obtenu dans le cas où il n'y a pas de champ; les gouttes sont moins nombreuses et plus grosses.

Si l'on compare entre elles les photographies de l'une de ces deux séries, on remarque qu'elles ne sont pas absolument identiques, mais qu'elles ne présentent pas de variations systématiques correspondant aux changements de sens du champ électrique. La dissymétrie n'apparaît donc pas quand tout l'intervalle compris entre les plateaux est soumis à l'ionisation. Comme j'ai déjà eu l'occasion de le dire au sujet des radiations parasites, ce résultat était à prévoir par raison de symétrie, mais c'est pour compléter l'étude à l'aide du tube de Crookes que j'ai tenu à fixer par la photographie toutes ces actions. En résumé, dans les expériences où j'ai observé la dissymétrie, les perturbations apportées par les radiations parasites sont insignifiantes, et, au point de vue de l'action du champ électrique, *tout se passe comme si les rayons* X *étaient seuls en jeu.*

Avant d'aborder à nouveau l'étude de la dissymétrie, en utilisant comme source ionisante un tube focus, je me suis proposé d'étudier plus complètement les radiations émises par un tel tube.

## CHAPITRE VIII.

### Étude des radiations émises par les diverses parties d'un tube focus bianodique.

Les résultats indiqués dans la première Partie de ce Chapitre ne sont pas nouveaux; cependant, j'ai cru bon de faire personnellement l'étude du tube en expérience, plutôt que de faire appel aux renseignements généraux, qui se trouvent dans les cours.

Dans ces expériences j'utilisais une plaque photographique protégée par une feuille de papier noir sur laquelle j'avais disposé parallèlement et à peu de distance l'une de l'autre d'étroites bandes métalliques inégalement aptes à se laisser traverser par les rayons X. Les parties de la plaque non recouvertes par les écrans étaient attaquées directement et noircissaient plus ou moins au développement, suivant que les rayons émis étaient en plus ou moins grande quantité. Les parties couvertes étaient frappées par les rayons qui avaient traversé les écrans; les rayons mous devaient être arrêtés à peu près également par des écrans présentant cependant une grande différence au point de vue de l'opacité, aux rayons X ordinaires, de sorte que la plaque devait présenter, après développement, des bandes claires, différant peu entre elles.

Au contraire, avec des rayons durs, c'est-à-dire pénétrants, les parties couvertes de la plaque devaient être attaquées plus ou moins énergiquement suivant le degré d'opacité des écrans.

J'ai vérifié avec ce dispositif que la partie du tube située en arrière de l'anticathode émettait des rayons mous, alors que l'autre moitié émettait un rayonnement plus intense et beaucoup plus pénétrant. Dans tous les cas, une lame de plomb de $4^{mm}$ suffit pour arrêter les rayons.

Dans le but de rechercher si les rayons X émanant de la moitié la plus active du tube étaient dispersés, c'est-à-dire pouvaient s'échapper dans des directions présentant une assez grande inclinaison avec la normale, j'ai utilisé le dispositif suivant :

L'anticathode était disposée horizontalement et un écran de plomb, placé verticalement à quelques centimètres du tube, interceptait les rayons émanant de la moitié la moins active du tube. En arrière de cet écran et

parallèlement à lui, était placée une plaque photographique entourée de papier noir; elle était barrée de haut en bas, vers le milieu et dans toute sa longueur, par une bande de plomb étroite.

Une partie de cette plaque émergeait au-dessus de l'écran et pouvait être frappée par des rayons émanant normalement de la moitié la plus active. Toute la plaque pouvait recevoir des rayons émanant de cette moitié, si de cette région partaient des rayons dispersés. La durée d'exposition aux rayons était de 3 minutes.

Après développement, la partie supérieure de la plaque photographique ainsi placée était très noire; au-dessous, l'attaque était bien moins énergique et allait en diminuant peu à peu de haut en bas; la ligne de démarcation était très nette. La partie de la plaque située derrière la bande de plomb était restée claire et faisait mieux ressortir l'attaque des autres parties.

Ainsi l'écran de plomb a limité nettement l'action principale du tube, et pour qu'il en soit ainsi, il faut que les rayons émanant des différents points du tube s'échappent, principalement dans une direction déterminée qui paraît être la normale. Si ces rayons étaient seuls, la plaque ne devrait pas être attaquée dans la partie qui est protégée des rayons normaux par l'écran de plomb. Or il y a attaque, et les rayons agissants ne peuvent provenir que de la moitié supérieure; comme l'écran de plomb limite le faisceau, la partie inférieure de la plaque ne peut être atteinte que par des rayons faisant de grands angles avec la normale correspondante, c'est-à-dire présentant une grande dispersion.

On s'explique alors très bien pourquoi l'attaque par les rayons dispersés est moins énergique au fur et à mesure que l'on descend le long de la plaque, c'est qu'alors la portion du tube capable d'envoyer des rayons dispersés pouvant l'atteindre est de plus en plus restreinte.

Pour être certain que la plaque photographique n'avait pas été impressionnée par des radiations ayant traversé l'écran de plomb, j'ai placé cet écran de façon à arrêter tous les rayons émanant du tube, et derrière, une plaque photographique a été disposée à la même distance que la précédente. Après avoir fait fonctionner le tube pendant 3 minutes, la plaque a été développée et elle ne présentait aucune trace d'attaque.

En résumé, de la moitié la plus active du tube s'échappent des rayons X, principalement dans des directions normales au tube, et ces rayons sont plus actifs, plus pénétrants que ceux émis par l'autre moitié. Mais des différents points partent en outre des rayons X dispersés dans toutes les directions. J'ai déjà eu l'occasion de faire état de la dispersion présentée par ces rayons.

Il est intéressant d'étudier ces radiations au point de vue de leur puissance d'ionisation.

La chambre de condensation était disposée au-dessous du tube, en arrière de l'anticathode et à une distance de $17^{cm}$ de celle-ci. Elle était protégée successivement par des écrans de plomb de $8^{mm}$, $4^{mm}$, $1^{mm},5$ d'épaisseur.

La durée d'exposition aux rayons était de 2 secondes, et la photographie était prise 1 seconde après la détente ($d = 1,26$), et l'on observait dans tous les cas une assez forte condensation.

La comparaison des photographies indique une condensation un peu moins forte quand la chambre est protégée par $8^{mm}$ de plomb; mais dans les deux autres cas, les photographies sont à peu près identiques, malgré la différence d'épaisseur des écrans. D'ailleurs, la diminution présentée dans le cas de l'écran de $8^{mm}$ n'est pas en rapport avec la variation d'épaisseur.

Ce résultat concorde avec ceux obtenus précédemment : *L'effet produit par les rayons parasites paraît peu sensible à la variation d'épaisseur de l'écran.*

Si l'on supprimait la lame de plomb, on obtenait une condensation très forte, présentant l'aspect d'un brouillard épais. Toutes les conditions expérimentales étaient les mêmes, sauf une : la photographie avait été prise 3 secondes après la détente. Au bout de 1 seconde, en effet, le brouillard était trop intense et les gouttes se distinguaient moins bien.

Si l'on compare cette dernière condensation avec celles obtenues dans le cas où il y a interposition d'écrans de plomb, on voit que l'ionisation produite par les rayons X est beaucoup plus forte que celle produite par les rayons parasites.

La forte condensation produite par les rayons X provenant de cette face, rayons qui, nous l'avons vu, sont peu énergiques, montre en outre que l'*utilisation de ces phénomènes de condensation constituerait une méthode extrêmement sensible pour reconnaître la présence de radiations ionisantes, en particulier de rayons* X.

Des expériences analogues ont été ensuite entreprises en disposant le tube de façon que la chambre de condensation soit en dessous, à la même distance de l'anticathode, mais cette fois du côté de la moitié la plus active. Un écran de plomb de $4^{mm}$ d'épaisseur protégeait la chambre. Le degré de détente était le même que dans les expériences précédentes, la durée d'exposition aux radiations était de 2 secondes et la photographie était prise 1 seconde après la détente. On obtenait ainsi un nuage intense. Cette photographie peut être comparée à celle prise dans des conditions analogues, mais sous l'action de rayons émanant de la moitié la moins active du tube. De cette comparaison, il ressort que la condensation obtenue dans la dernière expérience réalisée est beaucoup plus forte que celle obtenue dans les mêmes conditions avec la moitié la moins active du tube.

Enfin, après avoir supprimé l'écran de plomb inter-

posé, la chambre était soumise aux radiations pendant 2 secondes, et la photographie était prise 15 secondes après la détente ($d = 1{,}26$); au bout de ce temps on avait encore un brouillard extrêmement dense. La comparaison avec la photographie prise dans des conditions analogues, mais en utilisant la moitié la plus active et 3 secondes seulement après la détente, prouve que les *rayons émis par la bonne moitié du tube ont une action ionisante beaucoup plus énergique que celle des rayons émis par l'autre moitié.*

J'ai déjà été conduit à faire une constatation analogue avec les rayons parasites.

Dans une dernière série d'expériences, j'ai étudié l'action de la distance et l'action comparée des rayons X et des rayons parasites obtenus dans des conditions que je vais préciser.

La chambre de condensation était d'abord soumise à l'action ionisante d'un tube focus dont l'anticathode disposée horizontalement était dans le même plan que le plateau métallique intérieur. Un écran de plomb de $4^{mm}$, épaisseur suffisante pour arrêter les rayons X, était disposé entre la chambre de condensation et le tube; il portait une fente horizontale de $2^{mm}$ de largeur environ et située dans le plan commun à l'anticathode et au plateau métallique : C'était en somme un dispositif analogue à celui de M. Wilson; un écran au platinocyanure de baryum placé entre la chambre et l'écran de plomb présentait une trace fluorescente peu brillante en face de la fente. Le plan de l'anticathode ne limitant pas la partie inférieure du faisceau, comme je l'ai montré précédemment je n'avais aucun avantage à conserver ce dispositif et j'ai donné au tube d'autres positions pour lesquelles l'action sur l'écran fluorescent était beaucoup plus énergique. Cela a lieu, en particulier, quand on dispose l'anticathode verticalement en avant de la fente de l'écran ou

en l'inclinant à 45°; j'ai conservé cette dernière position.

Dans une première expérience, l'écran de plomb était à $4^{cm}$ de la chambre et l'anticathode à $12^{cm}$ de l'écran de plomb. La fente était fermée par une plaque de plomb de $4^{mm}$ d'épaisseur. Durée d'exposition aux rayons, 2 secondes; photographie, 2 secondes après détente ($d = 1{,}255$). On obtenait ainsi un fort nuage. Dans une seconde expérience réalisée dans les mêmes conditions, mais fente ouverte, on obtenait un fort brouillard.

Le tube était ensuite reculé à une distance telle que l'anticathode était à $29^{cm}$ de l'écran de plomb et deux photographies étaient prises dans les mêmes conditions que précédemment; comparées entre elles, elles montrent que la condensation est ici encore plus forte quand la fente est ouverte que lorsqu'elle est fermée. Comparées aux précédentes, elles indiquent une diminution de la condensation correspondant à l'éloignement du tube.

Le tube était enfin reculé de telle sorte que l'anticathode soit à $50^{cm}$ de l'écran de plomb; la fente était successivement fermée et ouverte, les autres conditions expérimentales étaient les mêmes. On obtenait ainsi deux photographies qui comparées entre elles, paraissent correspondre à des condensations sensiblement égales, ce qui revient à dire, qu'à cette distance, les rayons X émanant du tube sont sans action sur l'air contenu dans la chambre de condensation, alors que les rayons parasites agissent encore. Ces résultats vérifient ce qui a déjà été dit précédemment, savoir : que les rayons X sont plus sensibles à l'action de la distance que les rayons parasites, et qu'en approchant le tube de la chambre de condensation, on fera prédominer l'action des rayons X, comme cela a eu lieu avec le tube de Crookes.

## CHAPITRE IX.

### Étude photographique de la dissymétrie à l'aide d'un tube focus.

De ce qui précède, il résulte que pour réaliser correctement l'expérience de M. Wilson en utilisant comme source ionisante *le tube focus qui m'a servi*, il conviendrait de se mettre à l'abri des rayons parasites, en particulier d'utiliser un écran de plomb très épais dans lequel serait pratiquée une fente étroite laissant passer le faisceau ionisant.

Or, l'étude des radiations émises par le tube a montré que l'action ionisante des rayons X est très sensible à l'effet de la distance, alors que l'action ionisante des rayons parasites l'est beaucoup moins. D'autre part, elle a montré aussi que les rayons X émis par la *bonne* moitié du tube ont un pouvoir d'ionisation très supérieur à celui des rayons parasites. En approchant suffisamment l'ampoule à rayons X de la chambre de condensation, on pourra donc faire prédominer l'action de ces derniers rayons, comme cela a eu lieu avec le tube de Crookes.

Les expériences effectuées avec ce dernier tube ont montré en outre l'efficacité de la méthode photographique,

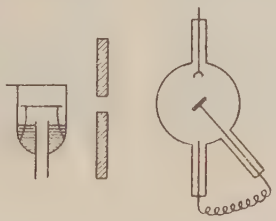

Fig. 19.

permettant d'accuser des différences qui étaient difficilement appréciables par observation directe.

Pour toutes ces raisons, j'ai résolu de n'employer qu'un écran de plomb de $4^{mm}$ d'épaisseur, suffisant pour arrêter les rayons X, et d'utiliser le dispositif de la figure 19 déjà installé; l'anticathode était à $12^{cm}$ de l'écran et ce dernier à $4^{cm}$ de la chambre de condensation. La largeur de la fente était de $2^{mm}$ environ.

D'ailleurs, des expériences accessoires exécutées avec le tube focus l'avaient un peu affaibli, les effets produits par les rayons parasites étaient moins énergiques qu'au début, et c'était encore une raison pour ne pas augmenter tout d'abord l'épaisseur de l'écran.

Les conditions expérimentales étaient les mêmes qu'avec le tube de Crookes (1) : Un champ de 4 volts était établi entre les plateaux et à chaque expérience on changeait le sens; l'air était soumis pendant 2 secondes à l'action ionisante des rayons qui se produisait encore au moment de la détente, et le nuage obtenu était photographié 2 secondes après la détente. Le degré de détente avait toujours la même valeur, ($d = 1{,}255$).

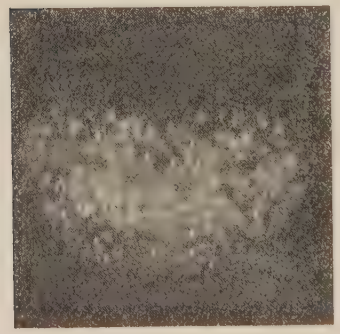

Fig. 20.

Fig. 21.

Vingt-trois photographies ont été prises, et, dans la très grande majorité des cas, la dissymétrie apparaît très

(1) E. Besson, *C. R. Acad. Sc.*, t. CLIII, 24 juillet 1911, p. 250.

nettement. La photographie (*fig.* 20) correspond au cas où les ions négatifs sont en excès, la photographie (*fig.* 21) correspond au cas où ce sont les ions positifs qui dominent.

*S'il y a incertitude dans quelques cas, cela tient à ce que les difficultés rencontrées sont nombreuses et qu'il est très difficile de se placer dans des conditions expérimentales identiques* :

1° Il est très difficile d'obtenir *rigoureusement* le même degré de détente dans des expériences consécutives; il faut en effet pour cela amener le trait tracé sur le piston en regard d'une certaine division du cylindre de verre et la coïncidence n'est jamais parfaite. Or l'intervalle de deux traits consécutifs du cylindre de verre est de $1^{mm}$, et quand on fait varier le degré de détente en passant d'un trait au suivant, les nuages correspondants présentent une différence très sensible. On ne peut pas apprécier à l'œil le $\frac{1}{10}$ de millimètre; supposons que dans une première expérience, le trait tracé sur le piston soit de $\frac{1}{10}$ de millimètre au-dessous du trait correspondant tracé sur le cylindre de verre et que, dans l'expérience suivante, l'erreur soit du même ordre, mais en sens inverse, l'intervalle qui séparera les positions occupées dans ces expériences par le trait tracé sur le piston sera de $\frac{1}{5}$ de millimètre, et dans le deuxième cas, on devra avoir une condensation un peu plus forte que dans le premier. Or, si les autres conditions expérimentales étaient telles (ions positifs en excès) qu'on aurait dû avoir une condensation plus faible, l'erreur provenant de la position du piston tendra à masquer le phénomène que l'on devait observer.

2° La détente doit être également brusque dans toutes les expériences d'une même série. Pour cela, il faut que la force qui sollicite le piston de haut en bas, au début de la détente, soit la même dans chaque expérience, c'est-à-dire que la différence des pressions s'exerçant au-dessus et en dessous du piston soit la même. Or, étant donné

le volume occupé par le gaz (plus de $400^{cm^3}$), la petite erreur résultant de la mauvaise position du piston ne modifie pas de façon sensible la pression de la masse gazeuse au moment où la détente va se produire; on peut donc admettre que cette pression qui s'exerce sur la face supérieure du piston est la même dans toutes les expériences, pour le même degré de détente.

D'autre part, il a été dit en décrivant l'appareil que, grâce à un manomètre à mercure, on avait approximativement la pression du gaz occupant le gros récipient utilisé pour produire la détente; grâce à un repère tracé sur le manomètre, on attend que le mercure remonte à la même position, et, à ce moment, on tire la soupape qui provoque la détente. Si cette soupape s'ouvre aussi vivement dans chaque expérience, la pression au-dessous du piston sera la même dans chaque cas. La différence des pressions sera donc toujours la même.

Ainsi, grâce à l'utilisation du manomètre, la rapidité de la détente ne dépend que de la vitesse avec laquelle on ouvre la soupape et on le fait chaque fois le plus vivement possible. De ce côté, je crois que la cause d'erreur est faible.

3° La source ionisante n'est pas rigoureusement constante. En effet, l'état des contacts de platine du trembleur de la bobine change probablement d'une expérience à l'autre, et, pendant les deux premières secondes de marche d'une bobine, on ne peut pas affirmer que l'appareil fonctionne identiquement dans chaque cas. Ici encore, il peut se faire parfois que la perturbation apportée de ce chef ait pour effet de masquer le phénomène que l'on devrait observer.

4° Au moment de la détente, il se produit des remous qui agitent diversement la masse gazeuse et qui font que deux détentes identiques ne donnent pas naissance à la même apparence sur le verre dépoli de l'appareil

photographique. On conçoit donc que, dans certains cas, la perturbation apportée par ces remous tende à masquer le phénomène que l'on doit observer relativement à la dissymétrie.

## CHAPITRE X.

### Phénomènes de condensation produits par la détente dans une atmosphère de gaz $CO^2$ (1).

Le gaz $CO^2$ a été obtenu en décomposant le bicarbonate de potassium par la chaleur; l'appareil était rempli par déplacement en provoquant un abondant dégagement de gaz.

Avec ce gaz, la condensation ne commence pas à se produire pour le degré de détente $d = 1{,}25$, et jusqu'à 1,30 on n'observe que quelques gouttes. Pour des détentes comprises entre 1,30 et 1,32, on n'observe qu'une faible augmentation des gouttes. C'est seulement pour $d = 1{,}33$ que l'on obtient une petite pluie encore peu dense. Pour la valeur $d = 1{,}34$ du degré de détente, la pluie devient nettement plus abondante et croît ensuite peu à peu. Le Tableau I résume les résultats obtenus.

TABLEAU I.

| Degré de détente. | Phénomène observé. |
|---|---|
| Valeurs inférieures à 1,30..... | Rien ou quelques rares gouttes. |
| Valeurs comprises entre 1,30 et 1,32 inclus..... | Quelques gouttes de plus. Condensation insignifiante. |
| $d = 1{,}332$..... | Petite pluie encore peu dense. |
| $d = 1{,}34$..... | Augmentation nette de la pluie. |
| Valeurs comprises entre 1,34 et 1,40 inclus..... | Augmentation lente de la pluie. |

(1) E. BESSON, *C. R. Acad. Sc.*, 5 février 1912.

TABLEAU I (*suite*).

| Degré de détente. | Phénomène observé. |
|---|---|
| Valeurs comprises entre 1,41 et 1,44 inclus..... | Accroissement rapide de la pluie avec le degré de détente. |
| Valeurs comprises entre 1,453 et 1,50 inclus..... | Nuage épais, restant assez longtemps en suspension, accroissement assez lent de l'intensité avec le degré de détente. |
| $d = 1,51$..... | Changement très sensible; brouillard très épais restant longtemps en suspension. |
| Valeurs supérieures à 1,51..... | Même apparence : l'intensité du brouillard paraît peu sensible à l'accroissement du degré de détente. |

C'est pour une valeur de $d$ voisine de 1,453 que l'augmentation du nuage se fait surtout sentir. La méthode photographique a été utilisée pour faire cette étude; pour les raisons que j'ai déjà développées, la méthode ne permet pas de faire des comparaisons tant que les nuages n'ont pas une certaine intensité; dans ces expériences, elle m'a surtout servi pour des valeurs de la détente comprises entre 1,41 et 1,51. La limite supérieure $d = 1,51$ est très nettement établie; la limite inférieure est moins précise, elle se trouve au voisinage de 1,33.

Dans l'intention de la déterminer plus rigoureusement, j'ai soumis le gaz à l'action ionisante des rayons de Röntgen; la durée d'exposition était de 2 secondes. La première pluie appréciable se produisait pour $d = 1,30$. Comme cela a déjà lieu dans le cas de l'air, sous l'action des rayons de Röntgen, la condensation apparaît un peu plus tôt que sans ionisation préalable.

De l'air ayant pénétré accidentellement dans la chambre de condensation, le degré de détente limite inférieure fut trouvé abaissé; il était ramené à 1,30 (au lieu de 1,33)

dans le cas où l'air n'était pas soumis à l'action des rayons X et il était ramené à 1,28 (au lieu de 1,30) quand l'air était préalablement ionisé par ces rayons. Pour des détentes un peu supérieures, on obtenait des nuages, presque des brouillards. Cependant la quantité d'air qui avait pénétré était certainement petite.

*Il faut donc en conclure que la présence d'une petite quantité d'air dans le gaz* $CO^2$ *abaisse notablement la limite inférieure de la détente qui provoque le commencement de la condensation. Il importe donc d'éliminer toute trace d'air.*

Je me suis alors proposé de reprendre l'étude précédente en prenant des précautions particulières pour éliminer l'air.

Comme précédemment, l'appareil est rempli par déplacement en utilisant un violent dégagement de $CO^2$. L'eau distillée qui doit être introduite dans l'appareil a été soumise à une ébullition prolongée pour éliminer les gaz dissous. Pour plus de précautions, cette eau a séjourné pendant une nuit dans l'appareil rempli de $CO^2$, le piston étant au bas de sa course. Dans ces conditions, les petites bulles d'air, qui avaient pu rester adhérentes aux parois au moment où l'eau a été versée, ont pu se détacher et venir crever à la surface. Si besoin est, le choc produit par quelques détentes achève de libérer ces bulles. Le lendemain, on remplit à nouveau de $CO^2$. Les résultats obtenus sont contenus dans le Tableau suivant :

TABLEAU II.

| Degré de détente. | Phénomène observé. |
|---|---|
| Valeurs inférieures à 1,345..... | Rien ou quelques rares gouttes. |
| $d = 1,345$..... | Faible pluie. |
| Valeurs comprises entre 1,345 et 1,466 inclus..... | La pluie augmente peu à peu avec la détente et l'on finit par obtenir des nuages assez intenses. |
| $d = 1,477$..... | Augmentation brusque, nuage épais. |

Tableau II (*suite*).

| Degré de détente. | Phénomène observé. |
|---|---|
| Valeurs comprises entre 1,477 et 1,51 inclus..... | Nuage épais, accroissement assez lent de l'intensité avec le degré de détente. |
| $d = 1,523$..... | Changement très sensible, brouillard très épais, restant longtemps en suspension. |
| Valeurs supérieures à 1,523.... | Même apparence : l'intensité du brouillard paraît peu sensible à l'accroissement du degré de détente. |

La comparaison des résultats contenus dans les Tableaux I et II montre que les précautions prises pour mieux éliminer les traces d'air ont eu pour effet de remonter la limite inférieure et la limite supérieure du degré de détente.

Elle montre aussi que les phénomènes observés ne sont pas tout à fait les mêmes; par exemple, dans les expériences relatives au Tableau II, on n'observe pas de variation brusque dans les nuages avant le degré de détente 1,477, tandis que dans les expériences relatives au Tableau I on observe déjà un accroissement appréciable pour la valeur $d = 1,41$. On en observe un autre pour la valeur $d = 1,45$ environ (on a alors un nuage épais), mais le changement n'est pas aussi brusque que dans la seconde série d'expériences pour $d = 1,477$; cela tient à ce que, à partir de la valeur $d = 1,41$, les nuages sont plus épais dans la première série d'expériences que dans la seconde.

Toutes ces différences sont probablement dues à ce fait que dans la seconde série d'expériences, le gaz $CO^2$ était mieux privé des dernières traces d'air. La présence de l'air a pour effet d'abaisser la limite inférieure du degré de détente, c'est-à-dire de faire apparaître la condensation, alors que sans ce gaz, il ne devrait rien se produire; d'une

manière générale, pour un degré de détente donné, le nuage sera plus intense quand de l'air sera mélangé au gaz $CO^2$.

Les photographies prises permettent le contrôle des résultats obtenus et je ne présenterai ici que les plus caractéristiques, en particulier celles qui montrent l'accroissement de condensation quand on passe du degré de détente 1,46 au degré de détente 1,47. Je l'ai observé

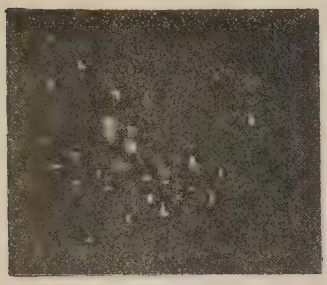

Fig. 22. — $d = 1{,}46$.

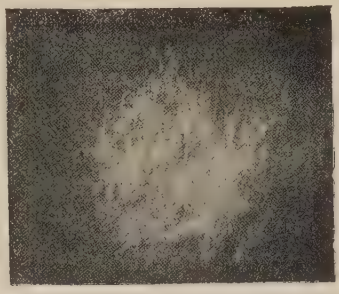

Fig. 23. — $d = 1{,}47$.

dans trois séries d'expériences et les photographies (*fig* 22) et (*fig* 23) l'indiquent très nett ment.

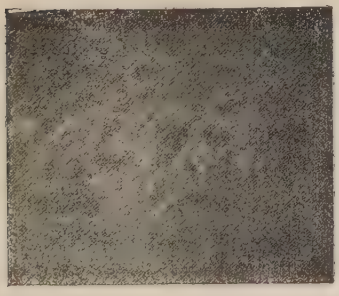

Fig. 24. — $d = 1{,}51$.

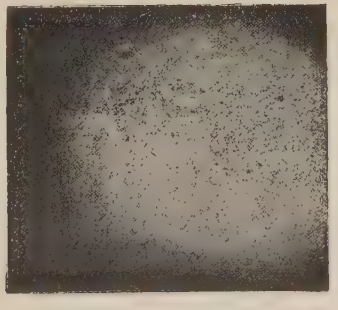

Fig. 25. — $d = 1{,}523$.

Pour des détentes comprises entre 1,47 et 1,51 inclus, les photographies obtenues sont sensiblement les mêmes,

ce qui prouve que les nuages eux aussi n'ont guère varié malgré l'accroissement du degré de détente. Les photographies (*fig.* 24) et (*fig* . 25)sont relatives aux degrés de détente $d = 1{,}51$ et $d = 1{,}523$, et si l'on compare les figures 23 et 24, on observe que leur aspect est sensiblement le même malgré la différence appréciable du degré de détente (1,47 à 1,51). La comparaison des figures 24 et 25 indique au contraire une différence énorme en faveur de cette dernière. Le nuage change complètement d'aspect et fait place à un brouillard épais.

Toutes ces photographies ont été prises 2 secondes après la détente.

Ces brouillards, très denses, sont difficiles à différencier si on les photographie très peu de temps après leur formation. Pour les comparer plus facilement, je les ai photographiés 8 secondes après la détente; au bout de ce temps, ils se seront affaiblis et s'il y a une différence entre eux, elle sera plus sensible à ce moment.

On obtient alors des apparences qui sont sensiblement les mêmes, malgré l'accroissement du degré de détente. La valeur $d = 1{,}523$ est donc bien la limite supérieure du degré de détente à partir de laquelle la condensation ne paraît pas sensiblement affectée par l'augmentation de ce degré.

Comme cela a eu lieu dans la série d'expériences relatives au Tableau I, j'ai essayé l'action des rayons X. pour chercher à préciser la limite inférieure du degré de détente dans les expériences relatives au Tableau II. Cette limite qui était 1,345 sans ionisation préalable se trouvait abaissée à 1,324 quand le gaz était soumis à l'action des rayons X. Ici encore la limite inférieure se trouve abaissée quand le gaz est soumis aux rayons X.

De ces deux valeurs, quelle est celle qu'il convient de prendre ? Il serait, je crois, préférable de prendre celle qui correspond au cas où le gaz est ionisé par les rayons de Röntgen, et cela pour les deux raisons suivantes :

1° Quand le gaz n'est pas préalablement ionisé, la condensation est très faible au début; d'ailleurs, une fois que cette condensation s'est produite, il arrive que même pour des détentes très inférieures à la détente limite, on observe parfois quelques gouttes. Il en résulte que, de l'apparition de quelques gouttes, on ne peut pas conclure que le phénomène commence. Bien que je me sois contenté d'une pluie très faible pour indiquer le début du phénomène, il est probable que j'ai un peu dépassé la vraie limite.

J'ai en outre observé souvent une particularité qui vient encore compliquer la recherche de la limite inférieure. Ayant produit une faible pluie, par exemple en utilisant le degré de détente 1,34, ou quelques gouttes avec le degré de détente 1,33 (expériences relatives au Tableau II), il arrivait parfois qu'en produisant ensuite une détente beaucoup plus faible, par exemple inférieure à 1,25, on obtenait une pluie *plus abondante* que celle obtenue primitivement avec une détente plus forte.

En étudiant la condensation dans l'air, nous avons vu aussi qu'ayant produit un nuage pour une détente supérieure à la détente limite, une nouvelle détente inférieure à la limite $d = 1{,}25$ donnait naissance à un nuage secondaire provenant de centres résiduels incomplètement évaporés et jouant le rôle de poussières. Mais ces nuages correspondaient à des nuages primitifs épais, et étaient *plus faibles* ou au plus *sensiblement égaux* aux nuages primitifs. Dans ces expériences, des nuages primitifs faibles, ou des pluies, donnaient naissance à des phénomènes secondaires faibles ou insignifiants.

Or, dans le cas qui me préoccupait avec $CO^2$, la pluie primitive était relative à une détente voisine de la limite inférieure, elle était faible et la pluie secondaire était *plus forte.*

On pourrait peut-être proposer l'explication suivante : Au voisinage de la détente limite inférieure, les centres

capables de produire la condensation n'agissent pas tous complètement. Sur certains de ces centres, il y aurait formation de gouttes invisibles accompagnant les gouttes visibles du premier nuage. Ces gouttes invisibles s'évaporeraient lentement et serviraient de germes pour la détente suivante ($d < 1{,}25$), concurremment aux gouttes invisibles produites par les gouttes visibles, incomplètement évaporées.

Quelle que soit la cause de ce fait, il n'en est pas moins vrai qu'il vient encore compliquer la recherche de la limite inférieure du degré de détente. Je ne l'ai pas observé régulièrement pour toute détente voisine de la limite inférieure, et dès qu'on s'éloigne un peu au-dessus de cette détente, il ne se produit plus.

2° Quand l'air est préalablement ionisé, il y a un bien plus grand nombre de centres capables de produire la condensation, et quand on atteindra la limite à partir de laquelle la condensation devient possible, un plus grand nombre de centres y participeront, donnant ainsi naissance à un plus grand nombre de gouttes. Il sera donc plus facile d'observer alors le commencement du phénomène qui devra ainsi se produire plus tôt que lorsqu'il n'y a pas ionisation préalable.

J'ai vérifié expérimentalement qu'il en est bien ainsi dans des expériences ultérieures exécutées avec l'air; lorsque la chambre de condensation n'était séparée par aucun écran de la source ionisante, la condensation, sous forme de faible pluie, commençait un peu plus tôt que lorsque le rayonnement était limité à la fente.

En admettant cette manière de voir, il conviendrait de prendre 1,32 pour limite inférieure, déduite des expériences du Tableau II, et 1,52 pour limite supérieure du degré de détente.

Dans ses expériences avec le gaz $CO^2$, M. C.-T.-R.

Wilson (1) a trouvé comme limite inférieure de la détente dans le gaz *non ionisé* la valeur 1,36 et pour limite supérieure 1,53; les nombres que j'ai trouvés dans le cas de $CO^2$ non ionisé sont 1,345 et 1,523 en bon accord par conséquent avec ceux de M. Wilson.

D'ailleurs, son appareil permettait un remplissage plus facile qu'avec l'appareil de M. Langevin, construit plus spécialement pour étudier la condensation dans le cas de l'air, et il pourrait se faire que, malgré les précautions prises, le remplissage par déplacement n'ait pas réussi à éliminer toute trace d'air.

Il peut se faire aussi que cette différence, surtout sensible pour la limite inférieure, soit due en partie à l'incertitude observée quand il s'agit de préciser l'instant où commence le phénomène. Ceci est laissé à l'appréciation de chaque opérateur et il peut y avoir de légères divergences à ce sujet. J'ai dit que j'avais pris pour origine une pluie très faible.

M. A.-B. Chauveau, du Bureau Central météorologique, m'a fait très obligeamment remarquer que mes résultats relatifs au gaz $CO^2$ pouvaient être prévus en sens, et approximativement en grandeur en partant des résultats obtenus avec l'air, et en admettant que le même degré de sursaturation soit nécessaire pour produire le commencement du phénomène dans l'un et l'autre gaz.

Je me propose de faire l'inverse, c'est-à-dire de montrer que, partant des valeurs trouvées pour $CO^2$, ces valeurs cadrent avec celles adoptées pour l'air si l'on se place au point de vue de la sursaturation.

On utilise pour cela la formule de la détente adiabatique

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\gamma-1}$$

(1) C.-T.-R. Wilson, *Phil. Trans.*, 1897.

et la formule qui donne le degré de sursaturation

$$S = \frac{\pi_1}{\pi_2}\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma}.$$

Avec l'air la valeur de $\gamma = 1{,}41$ ; la valeur de $\theta_1 = 289°$ absolus (16° C.); pour la limite inférieure du degré de détente $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}25$.

On trouve

$$\theta_2 = 263°,75 (-9°,25 \text{ C.}) \quad \text{et} \quad S = 4{,}4.$$

Telle est la valeur de la sursaturation relative à la limite inférieure du degré de détente lorsque le gaz en expérience est l'air ; pour la limite supérieure $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}38$ et l'on a toujours $\theta_1 = 289°$ absolus.

On trouve

$$\theta_2 = 253°,7 \text{ absolus } (-19°,7 \text{ C.}) \quad \text{et} \quad S = 8{,}35.$$

Telle est la valeur de la sursaturation relative à la limite supérieure du degré de détente lorsque le gaz en expérience est l'air.

La valeur de $\gamma$ pour $CO^2$ n'est pas connue d'une façon précise, elle oscille entre 1,30 et 1,32. Si je prends cette dernière valeur pour effectuer le calcul du degré de sursaturation relatif à la limite inférieure pour laquelle $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}345$, $\theta_1$ étant toujours égal à 289° absolus.

On trouve

$$\theta_2 = 262°,8 (10°,2 \text{ C.}) \quad \text{et} \quad S = 4{,}4.$$

Telle est la valeur de la sursaturation relative à la limite inférieure du degré de détente lorsque le gaz en expérience est le gaz carbonique; pour la limite supérieure $\frac{v_2}{v_1} = 1{,}52$ ; $\theta_1 = 289°$ absolus.

On trouve

$$\theta_2 = 252°,7 (-20°,3 \text{ C.}) \quad \text{et} \quad S = 8{,}4.$$

Telle est la valeur de la sursaturation relative à la limite supérieure du degré de détente lorsque le gaz en expérience est l'acide carbonique.

Dans ces conditions, la concordance entre les valeurs du degré de sursaturation pour l'air et $CO^2$ est excellente.

M. Wilson (1) avait déjà signalé la bonne concordance entre les nombres trouvés par lui pour les valeurs extrêmes du degré de détente avec l'air et $CO^2$ quand on se plaçait au point de vue du degré de sursaturation. Ses recherches ne portaient d'ailleurs que sur la détermination des limites extrêmes de la détente pour un groupe de gaz dont faisait partie $CO^2$.

Mes recherches personnelles m'ont conduit également à la détermination de ces valeurs et m'ont permis, en outre, de décrire les phénomènes observés aux divers degrés de détente intermédiaires : *Grâce à la méthode photographique, j'ai pu fixer les apparences observées. J'ai signalé particulièrement une augmentation brusque pour* $d = 1{,}477$ *que j'ai retrouvée dans des expériences ultérieures, et qui a un grand intérêt comme je l'expliquerai plus tard.*

Je me suis proposé ensuite d'étudier les phénomènes de condensation obtenus par détente dans une atmosphère de gaz $CO^2$ préalablement ionisée et d'observer en particulier le phénomène de dissymétrie présenté par les ions positifs et négatifs.

Dans mes premières expériences avec $CO^2$, je m'étais astreint à préparer ce gaz par le procédé employé par M. Wilson : *Décomposition par la chaleur du bicarbonate de potassium,* pour me mettre autant que possible dans les mêmes conditions expérimentales. Par la suite, j'ai employé d'autres méthodes de préparation : *Décompo-*

(1) Wilson, *Phil. Trans.*, 1897.

*sition du bicarbonate de sodium par la chaleur, action de l'acide tartrique sur le bicarbonate de sodium en présence de l'eau,* j'ai obtenu la même limite inférieure.

J'ai enfin utilisé un tube à $CO^2$ liquide que l'on trouve dans le commerce et qui a l'avantage de donner à volonté un abondant dégagement de gaz. Au sortir du tube, $CO^2$ était lavé en passant dans quatre barboteurs contenant de l'eau. La limite inférieure était encore la même; dans la suite, c'est toujours ainsi que j'ai obtenu le gaz destiné à remplir mon appareil.

## CHAPITRE XI.

**Étude parallèle de la condensation quand le gaz est ionisé et de la dissymétrie présentée par les ions positifs et négatifs** (1).

1° *L'ionisation est produite par les rayons* X. — Le tube producteur de rayons X est placé dans une caisse métallique reliée au sol, portant en avant une fente hori-

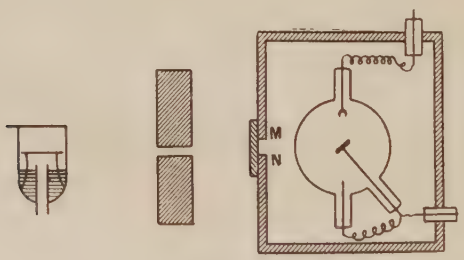


Fig. 26.

zontale MN fermée par une lame d'aluminium de $0^{mm},5$ d'épaisseur. Deux cylindres d'ébonite percés suivant leur axe livrent passage aux fils conducteurs. Deux écrans de plomb de $6^{cm}$ d'épaisseur, placés à peu de distance l'un de

(1) E. Besson, *C. R. Acad. Sc.*, 14 octobre 1912, p. 711.

l'autre laissent passer un faisceau étroit de rayons de Röntgen venant raser la plate-forme métallique située à l'intérieur de la chambre de condensation. Le gaz carbonique était soumis pendant 2 secondes à l'action du rayonnement; une batterie de deux accumulateurs établissait un champ de 4 volts entre les plateaux; le sens du champ variait à volonté.

Après un premier remplissage, on obtenait déjà une petite pluie pour la valeur $d = 1{,}324$ sans ionisation préalable, alors que dans des expériences précédentes ce résultat n'était obtenu que pour $d = 1{,}345$. De même, sous l'action des rayons de Röntgen, on obtenait une petite pluie pour $d = 1{,}306$, alors que dans d'autres expériences j'avais obtenu ce résultat pour $d = 1{,}324$.

Pour la valeur $d = 1{,}453$, sans ionisation préalable, on obtenait un nuage très épais, presque un brouillard, nuage beaucoup plus intense par conséquent que celui obtenu précédemment dans les mêmes circonstances. Il était évident pour moi que de l'air se trouvait mélangé à du gaz $CO^2$. Après un nouveau remplissage, voici les résultats obtenus :

*Sans ionisation préalable,* pour $d = 1{,}345$, et même pour $d = 1{,}351$, on n'obtient que quelques gouttes; pour $d = 1{,}361$, petite pluie; ensuite augmentation très lente de la pluie;

*Avec ionisation préalable* (2 secondes d'exposition aux radiations), pour $d = 1{,}324$, trois ou quatre gouttes seulement; pour $d = 1{,}332$, quelques gouttes de plus; pour $d = 1{,}342$, petite pluie. Ensuite la pluie va en augmentant nettement et je vais faire plus en détail l'étude de ces condensations.

Auparavant je ferai remarquer que la limite inférieure du degré de détente est plutôt relevée encore, même par rapport aux meilleures valeurs trouvées précédemment; dans le cas où le gaz n'est pas préalablement ionisé,

la détermination de cette limite devient réellement difficile. Les valeurs trouvées sans ionisation préalable dans ce cas sont à peu près les mêmes que celles trouvées par M. C.-T.-R. Wilson (1). Dans le cas où le gaz est soumis à l'action des rayons X, la limite inférieure est comprise entre 1,33 et 1,34. Dans ces expériences, la condensation apparaît aussi un peu plus tôt quand le gaz est soumis à l'action des rayons X que lorsqu'il n'est pas ionisé.

C'est pour ces expériences que j'ai obtenu les valeurs les plus élevées de la limite inférieure du degré de détente, et cependant à chaque remplissage je prenais les mêmes précautions et j'utilisais un violent dégagement de gaz carbonique.

Ces résultats mettent en évidence une fois de plus l'importance du rôle de l'air en tant qu'impureté dans le gaz $CO^2$, aussi bien au point de vue de la valeur de la limite inférieure du degré de détente, que de l'importance de la condensation observée soit sous forme de pluie, soit sous forme de nuage.

*La dissymétrie apparaît très nettement par observation directe;* la pluie ou le nuage qui résulte de la condensation sur les ions négatifs en excès est visiblement plus intense que dans le cas où ce sont les ions positifs qui prédominent.

Le phénomène observé est *beaucoup plus net que dans le cas de l'air.*

Ayant voulu comparer le nuage obtenu dans le cas le plus favorable (ions négatifs en excès) avec celui que l'on obtient quand il n'y a pas de champ électrique, j'ai observé une particularité singulière. Contrairement à mon attente, contrairement à ce qui se produit pour l'air, sans champ, pour le même degré de détente, le nuage ne paraît pas plus intense que celui obtenu avec les ions

(1) C.-T.-R. Wilson, *loc. cit.*

négatifs en excès; on dirait même parfois qu'il est moins intense.

Un instant, je me suis demandé si, par suite d'un mauvais contact, je ne supprimais pas le champ quand je pensais faire prédominer les ions négatifs. Pour me fixer sur ce point, j'ai permuté les fils reliant l'inverseur aux pôles de la batterie d'accumulateurs; j'ai obtenu alors les mêmes résultats, mais pour des positions contraires de l'inverseur.

Le champ existait donc bien dans les expériences précédentes pour toutes les positions de l'inverseur. Pour faire cette étude, j'ai utilisé la méthode photographique; les clichés ont été pris et classés par groupes de trois dans les cas suivants : 1° les ions négatifs sont en excès; 2° les ions positifs sont en excès; 3° le gaz est ionisé, mais il n'y a pas de champ.

Les photographies sont prises un temps plus ou moins long après la détente, selon l'importance du nuage; ce temps varie de 2 à 5 secondes.

*Résultats :* 1° *Sans champ.* — Pour des valeurs inférieures à $d = 1{,}351$, la condensation est trop faible pour qu'on puisse employer la méthode. Pour cette valeur et pour $d = 1{,}361$, il y a peu de gouttes dans le champ du microscope; pour $d = 1{,}371$, il y a un accroissement sensible du nombre des gouttes. Au-dessus de cette valeur, les nuages croissent peu à peu jusqu'à ce qu'on atteigne la valeur $d = 1{,}476$ pour laquelle on observe une augmentation sensible. Pour des valeurs supérieures de $d$, l'intensité du nuage augmente peu à peu et à partir de 1,52 il n'y a plus d'augmentation appréciable.

Remarquer à ce sujet que si la limite inférieure du degré de détente s'est trouvée relevée comparativement aux expériences antérieures, la limite supérieure est restée la même.

D'après le classement adopté pour les photographies, il suffit de comparer entre elles la série obtenue en prenant la troisième de chaque groupe.

2° *Avec champ.* — La dissymétrie se manifeste à tous les degrés de détente inférieurs à 1,476. Quand les ions négatifs sont en excès, les nuages sont plus intenses que lorsque ce sont les ions positifs qui prédominent. Pour cette valeur, et pour les détentes supérieures, elle n'apparaît plus; les clichés obtenus deviennent brusquement denses et se ressemblent quel que soit le sens du champ.

Il semblerait toutefois que celui qui correspond au cas où les ions négatifs sont en excès est, dans chaque série, un peu plus foncé que celui qui est relatif aux ions positifs en excès. Mais comme il n'est pas possible d'obtenir deux fois de suite, pour une même détente, des nuages identiques, ces légères différences doivent être négligées, et il faut considérer qu'à partir de $d = 1{,}476$, il n'y a pas de différence à faire entre les deux espèces d'ions au point de vue de leur faculté de condensation.

3° En comparant les photographies obtenues, avec et sans champ, on constate que pour le même degré de détente, le nuage obtenu *sans champ* n'est pas plus intense que celui qu'on obtient quand *les ions négatifs sont en excès,* et cela, à tous les degrés de détente. Dans chaque série, la première et la troisième photographie sont sensiblement identiques. L'anomalie observée directement apparaît ici très nettement.

Parfois même, la photographie relative, au cas où il n'y a pas de champ, accuse même un nuage plus faible que lorsque le champ existe; il n'y a pas lieu de s'occuper de ces petites différences dont j'ai déjà donné la raison; on peut cependant en tirer un argument en faveur de cette idée, que, sans champ, le nuage *n'est pas plus intense* que dans le cas où, le champ existant, les ions négatifs sont en excès.

Fig. 29. — Sans champ.

Fig. 28. — Ions positifs en excès.

Fig. 27. — Ions négatifs en excès.

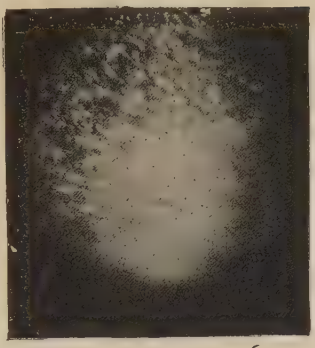

Fig. 32. — Sans champ.

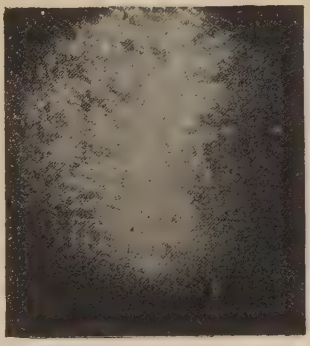

Fig. 31. — Ions positifs en excès.

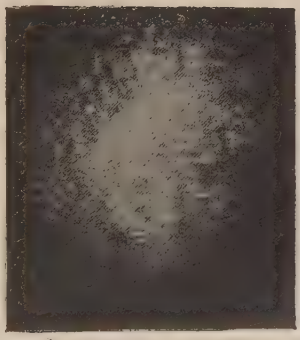

Fig. 30. — Ions négatifs en excès.

Parmi les nombreuses photographies prises, je n'en donnerai ici que quelques-unes des plus caractéristiques. Les photographies **27**, **28**, **29** sont relatives au degré de détente $d = 1{,}453$, la dissymétrie est très visible. Les photographies **30**, **31**, **32** sont relatives au degré de détente $1{,}476$, la dissymétrie ne s'observe plus; dans les deux séries, l'anomalie signalée s'observe.

Avec l'air, au contraire, le nuage obtenu sans champ est bien plus intense que celui obtenu avec les ions négatifs en excès pour le même degré de détente.

Il y a lieu de rapprocher la valeur du degré de détente $d = 1{,}476$, à partir de laquelle la dissymétrie cesse d'exister, de la valeur du degré de détente $d = 1{,}477$ pour laquelle la condensation observée sans ionisation préalable augmente brusquement.

La cause qui fait cesser la dissymétrie est sans doute aussi celle qui provoque l'augmentation brusque signalée dans le Tableau II pour ce degré de détente. Elle tiendrait par conséquent à ce que, pour cette valeur, les ions positifs entrent en action aussi complètement que les ions négatifs.

Je me suis enfin proposé de comparer les degrés de sursaturation correspondant au cas où la dissymétrie cesse d'exister dans l'air et dans $CO^2$. La valeur de $d$ dans l'air est $1{,}35$; si $\theta = 289°$ absolus (16° C.), on trouve

$$\theta_2 = 255°{,}6\ (-17°{,}4\ \text{C.}) \qquad \text{et} \qquad S = 7{,}2.$$

Avec le gaz $CO^2$ $d = 1{,}477$, $\theta_1 = 289°$ absolus, et l'on trouve

$$\theta_2 = 255°{,}1\ (-17°{,}9\ \text{C.}) \qquad \text{et} \qquad S = 7{,}09,$$

c'est-à-dire sensiblement $7{,}1$. La concordance entre ces valeurs est donc très bonne. Pour faire ce calcul, j'ai utilisé les formules employées antérieurement et les valeurs de $\gamma$ sont celles qui m'ont servi lors des calculs effectués

au sujet des détentes extrêmes. On comparera plus facilement ces résultats en les groupant en deux Tableaux de la façon suivante :

*Air.*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $\gamma = 1,41 \ldots$ | $\theta_1 = 289$ | $d = 1,25$ | $\theta_2 = 263,75$ | $S = 4,4$ |
| | $\theta_1 = 289$ | $d = 1,35$ | $\theta_2 = 255,6$ | $S = 7,2$ |
| | $\theta_1 = 289$ | $d = 1,38$ | $\theta_2 = 253,7$ | $S = 8,35$ |

$CO^2$.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $\gamma = 1,32 \ldots$ | $\theta_1 = 289$ | $d = 1,345$ | $\theta_2 = 262,8$ | $S = 4,4$ |
| | $\theta_1 = 289$ | $d = 1,477$ | $\theta_2 = 255,1$ | $S = 7,1$ |
| | $\theta_1 = 289$ | $d = 1.52$ | $\theta_2 = 252,7$ | $S = 8,4$ |

En résumé, les expériences exécutées avec le gaz $CO^2$ quand ce gaz n'est pas ionisé ou quand il est soumis à l'action des rayons X confirment les résultats obtenus avec l'air : Existence d'une limite inférieure et d'une limite supérieure de la détente, ainsi que d'une détente intermédiaire à partir de laquelle les ions positifs cessent d'avoir une faculté de condensation moindre que celle des ions négatifs.

La dissymétrie observée dans le cas de l'air apparaît ici beaucoup plus nettement et déjà par observation directe sans le secours de la méthode photographique.

On observe en outre l'anomalie suivante pour un degré de détente quelconque, le nuage obtenu sans champ est sensiblement le même que celui qui est obtenu avec champ quand les ions négatifs sont en excès.

Si l'on compare, à l'aide du Tableau précédent, les valeurs correspondantes des degrés de détente caractéristiques dans l'air et $CO^2$, on observe qu'avec ce dernier gaz les valeurs sont différentes de celles de l'air et beaucoup plus élevées. En changeant de gaz, on a changé de limites, et l'on peut considérer ces valeurs de la détente comme des caractéristiques de ces gaz au même titre que la densité ou la valeur de $\gamma$.

Cependant ces résultats, différents à ce point de vue, conduisent à des valeurs qui sont sensiblement les mêmes si l'on se place au point de vue de la sursaturation, comme le montrent les valeurs de S du Tableau précédent. De sorte que, si les valeurs limites du degré de détente peuvent varier d'un gaz à l'autre, les valeurs de la sursaturation sont sensiblement les mêmes pour les deux gaz.

Mes expériences sur le gaz $CO^2$ ont été interrompues par un accident arrivé à l'appareil, ce qui a motivé le remplacement du cylindre de verre gradué.

De nouveaux jaugeages ont donc été nécessaires. *Mesure de* $W_B$ —C. Voici les résultats trouvés dans trois expériences successives :

$$332^{cm^3},\quad 331^{cm^3},9,\quad 331^{cm^3},9.$$

La valeur adoptée est $332^{cm^3}$, comptée à partir du trait 2 de la graduation du cylindre de verre, en regard duquel se trouve le trait tracé sur le piston quand celui-ci repose sur la rondelle de caoutchouc.

Le volume du cylindre de verre du zéro au trait supérieur (110 divisions) est de $332^{cm^3}$; le volume d'une division est $\frac{332}{110} = 3,01^{cm^3}$.

Le volume extérieur du piston qui couvre une division de la graduation étant $2^{cm^3},5$ le volume d'une division annulaire du cylindre est 0,51; cela dans la partie cylindrique du piston.

En regard de la calotte sphérique, le volume d'une division annulaire dépend de la position de cette division; pour le déterminer j'ai entrepris une série de jaugeages comme cela avait été fait avec le premier appareil.

D'ailleurs, considérant comme établi par les premiers jaugeages l'égalité de $\varphi_e$ et $\varphi'_e$, les nombres que je viens de donner sont seuls nécessaires au calcul donnant la valeur du degré de détente.

Il conviendra, dans les expériences, de se souvenir que

le piston étant au bas de sa course, le repère qu'il porte est en face de la division 2 de la graduation du cylindre. Dans ces conditions, pour avoir le nombre de divisions qu'il convient d'introduire dans la formule, il faudra toujours retrancher 2 au nombre lu.

Je rappelle que le degré de détente est donné par la relation

$$d = \frac{W - v_e}{W - v_e - nv},$$

$$W = V_c + V_B - C - a.$$

Avec cet appareil

$$V_B - C = 332^{cm^3}, \quad a = 15^{cm^3}.$$

La chambre de condensation vide a une contenance de $207^{cm^3},6$, elle contient une plate-forme et son support dont le volume est $3^{cm^3},4$. Donc

$$V_c = 207,6 - 3,4 = 204,2.$$

Il en résulte

$$W = 521,2.$$

La formule générale qui donnera le degré de détente dans toutes les expériences qui vont suivre sera donc

$$d = \frac{521,2 - v_e}{521,2 - v_e - n \times 2,5}$$

Je me suis proposé de rechercher si l'anomalie signalée dans les expériences précédentes persistait à se produire quelle que soit la valeur du champ électrique. L'observation directe indiquait nettement que sous l'action d'un champ beaucoup plus fort (110 volts) elle cessait de se produire, alors qu'avec des champs de 8, 14, 18 volts elle semblait persister.

Des photographies ont été prises alternativement sans champ et avec champ (ions négatifs en excès) après avoir établi entre les plateaux des différences de potentiel de 50,

44, 40, 30 volts et suivant les séries pour des valeurs de la détente comprises entre 1,36 et 1,38; elles ont été prises de 3 à 5 secondes après la détente. De l'examen de l'ensemble de ces photographies, il résulte que l'anomalie ne se produit pas pour ces différences de potentiel.

Ayant changé de tube focus au cours de ces essais, j'ai vérifié entre temps qu'avec un champ de 4 volts, l'anomalie continuait à se produire.

Avec une différence de potentiel de 20 volts, le nuage obtenu, quand il y a champ, est un peu plus faible que celui observé sans champ.

Enfin, avec un champ de 14 volts, l'anomalie persiste comme cela avait déjà été remarqué dans la série utilisant des potentiels croissants de 8 à 18 volts; ces expériences ne permettent pas de préciser d'une manière rigoureuse la valeur du champ à partir de laquelle l'anomalie cesse de se produire; elles montrent seulement que cette singularité n'a plus lieu pour des voltages suffisamment élevés. Dans mes expériences cela paraissait se produire pour des champs supérieurs à 20 volts.

L'examen de ces photographies montre, en outre, qu'il est bien difficile d'obtenir une série un peu longue sans qu'il se produise des perturbations inattendues, malgré toutes les précautions prises.

## CHAPITRE XII.

### Recherche de la dissymétrie avec différents gaz ionisés par le radium.

1° *Gaz carbonique* [1]. — Les rayons émis sont très pénétrants et traversent des plaques de plomb de plusieurs centimètres d'épaisseur.

---

[1] E. Besson, *C. R. Acad Sc*, 14 octobre 1912.

Pour mettre la chambre de condensation à l'abri de ce rayonnement, on a disposé le tube contenant la substance radioactive, en arrière d'un écran constitué par deux blocs de plomb plats, de $10^{cm}$ d'épaisseur dans le sens horizontal et appliqués l'un sur l'autre; le tube est à la hauteur du plan de séparation des deux blocs.

Au bloc supérieur se trouve fixée une plaque de fer au-dessus de laquelle se trouve un électro-aimant en fer à cheval distant de $3^{mm}$ à $4^{mm}$. Quand l'électro est excité,

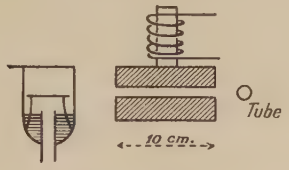


Fig. 33.

le bloc supérieur se soulève brusquement en demeurant parallèle à lui-même, grâce à un système de guides empêchant la plaque de fer de dévier; on obtient ainsi une fente qui reste ouverte pendant la durée d'exposition aux rayons; quand l'électro n'est plus excité, le bloc retombe sous l'action de son poids, et la fente est fermée. De cette façon on utilise des rayons bien horizontaux venant raser le plateau inférieur de la chambre de condensation.

A la vérité, le contact des deux blocs n'est pas parfait, et le rayonnement passe faiblement, produisant l'ionisation de l'air de la chambre de condensation; aussi, sans champ, une détente dans ces conditions produit un nuage plus intense que lorsque le tube radioactif est enlevé.

Mais si l'on crée un champ de 4 volts entre les plateaux, on n'a pas à tenir compte de cette filtration qu'il est impossible alors de mettre en évidence.

L'étude de la dissymétrie supposant ce champ de 4 volts établi constamment entre les plateaux, on peut

considérer le dispositif précédent comme constituant un écran parfait entre le tube et la chambre; cette dernière n'est soumise à l'ionisation que pendant le temps d'excitation de l'électro-aimant.

Lorsque des expériences doivent être effectuées sans champ, un aide supprime l'action du champ au moment précis où l'électro est excité, de sorte que, dans ce cas aussi, l'air n'est soumis au rayonnement que pendant la durée de l'excitation de l'électro-aimant.

Un basculateur permet de supprimer le champ ou d'en changer le sens suivant les cas.

Le gaz étant exposé au rayonnement pendant 5 secondes, pour la valeur $n = 51$, $d = 1{,}33$, on observait quelques gouttes; pour $n = 52$, $d = 1{,}34$ on observait une pluie très nette.

Le degré de détente correspondant à 52 est 1,34 et celui qui correspond à 51 est $d = 1{,}33$. On peut donc dire que la condensation commence à se produire pour une valeur intermédiaire; or dans une expérience précédente pour laquelle l'ionisation était produite par les rayons X, j'ai trouvé 1,33 comme limite inférieure.

*La limite inférieure est donc la même avec le radium qu'avec les rayons* X.

On a pris ensuite plusieurs séries de photographies (plus de 50 photos) dans le but de rechercher si l'anomalie observée avec les rayons X se produisait encore et si la dissymétrie se manifestait.

De leur observation il résulte que :

*a.* L'anomalie ne se produit pas avec le radium;

*b.* La dissymétrie s'observe, mais moins bien qu'avec les rayons X; il se produit parfois des irrégularités dont on ne soupçonne pas la cause, mais, en somme, dans la grande majorité des cas, la dissymétrie apparaît.

Les photographies ont été prises par séries de six, huit ou dix, et dans la plupart des séries on observe une dimi-

nution d'intensité dans les nuages au fur et à mesure qu'on avance dans chaque série.

Je me suis demandé si les insuccès et l'affaiblissement des nuages obtenus ne provenaient pas de modifications apportées à la manière d'être de la matière active du tube. Ce dernier reposait en effet sur un support faisant corps avec le support des plaques de plomb, et les ébranlements produits par chaque chute de la plaque pouvaient provoquer un tassement de la matière active pouvant produire des perturbations.

Pour éviter cela, le tube a été fixé à un support indépendant, et une dernière série de photographies a été prise dans ces conditions. La dissymétrie apparaît encore, mais pas sensiblement mieux que dans la plupart des expériences précédentes. Néanmoins, j'ai conservé ce dernier support, pour toutes les autres expériences exécutées avec le radium.

On pouvait s'attendre à trouver avec cette source ionisante une plus grande régularité dans la formation des nuages qu'avec les rayons X dont la production dépend de diverses conditions que l'on n'est pas toujours certain de réaliser identiquement dans les expériences.

Il n'en a rien été dans le cas du gaz carbonique, et j'ai eu ensuite l'occasion de faire la même vérification avec d'autres gaz.

2° *Le gaz en expérience est l'air.* — Profitant de ce que j'avais en ma possession un échantillon de matière radioactive, je me suis proposé de reprendre les expériences de dissymétrie en produisant l'ionisation de l'air avec cette source.

Les expériences réalisées avec le gaz carbonique ont montré que les ions produits ainsi ne se comportent pas toujours comme ceux qui prennent naissance sous l'action des rayons X, et qu'en particulier, la dissymétrie se mettait moins facilement en évidence.

Il était donc intéressant de voir ce qui se produirait avec l'air; on a utilisé le dispositif décrit précédemment.

J'ai tout d'abord déterminé la limite inférieure du degré de détente, quand le gaz est soumis à ces radiations, et la valeur trouvée a été $d = 1{,}245$; on peut donc dire que cette limite est la même qu'avec les rayons X. Quand l'air n'était pas ionisé préalablement, la limite inférieure trouvée a été 1,26. On a donc l'occasion de faire ici encore une remarque faite déjà avec le gaz carbonique : Quand un gaz est ionisé, la limite inférieure du degré de détente est un peu plus faible que celle qui correspond au cas où le gaz n'est pas soumis à une ionisation préalable.

Trois séries de photographies ont été prises dans les conditions suivantes : Durée d'exposition 5 secondes, photographie prise 3 secondes après la détente.

*Première série.* — La première a été prise lorsque le champ entre les plateaux était nul, et les autres alternativement avec ions négatifs en excès et ensuite ions positifs en excès. Le nuage obtenu sans champ est plus intense que ceux qui sont obtenus avec champ; mais si l'on compare ces derniers entre eux, on observe plutôt le contraire de la dissymétrie attendue; *les nuages correspondant aux ions positifs en excès sont plus intenses que ceux qui correspondent aux ions négatifs en excès.*

*Deuxième série.* — Les deux premières photographies ont été obtenues avec ions négatifs en excès, puis alternativement avec ions positifs en excès et ions négatifs en excès. Au début, les nuages correspondant au cas où les ions positifs dominent sont plus intenses que ceux qui correspondent au cas où ce sont les ions négatifs qui sont en excès; pour les photographies suivantes, il y a incertitude.

Le dernier nuage est très nettement plus faible que les

précédents de sa catégorie; j'ai déjà eu l'occasion de signaler un tel affaiblissement.

*Troisième série.* — Les photographies sont obtenues alternativement avec ions négatifs en excès, puis avec ions positifs en excès. Dans cette série, les nuages ont très sensiblement la même apparence.

En résumé, je n'ai jamais observé de nuages plus intenses avec ions négatifs en excès; j'ai observé quelquefois des nuages plus intenses avec ions positifs en excès, et dans d'autres cas, je n'ai pas pu faire de différence entre les diverses sortes de nuages.

*La dissymétrie observée dans le cas où l'air est ionisé par les rayons X ne s'est pas présentée dans le cas où la source ionisante est le radium*

Les ions produits par ces deux sources ne paraissent pas avoir des propriétés identiques au point de vue de la condensation; nous avons déjà vu qu'ils ne se comportaient pas de la même façon à un autre point de vue dans l'étude de la condensation avec $CO^2$.

3° *Le gaz en expérience est le méthane* — Le dispositif expérimental est le même; le gaz est préparé en faisant réagir le carbure d'aluminium sur l'eau à chaud. Comme il est souillé d'acétylène, on le fait barboter dans plusieurs laveurs contenant une solution de chlorure cuivreux ammoniacal et ensuite dans plusieurs laveurs contenant de l'eau. Le gaz est recueilli dans un réservoir d'où il est ensuite envoyé dans l'appareil par un courant d'eau sous pression.

La condensation commence à se produire pour la valeur $n = 47$ ($d = 1{,}30$); elle a été ensuite observée avec un degré de détente égal à 1,362 dans les conditions suivantes : Il n'y a pas de champ, la durée d'exposition aux radiations est de 5 secondes, et l'on observe le nuage 2 secondes après la détente.

Les résultats obtenus ont été très variables; tantôt, au bout de ce temps, il y avait un nuage appréciable, tantôt il n'y avait plus rien. Cependant, toutes les conditions expérimentales semblaient être restées les mêmes, et, tout d'abord, on serait tenté d'attribuer ces différences à une inégale activité de la matière radioactive; cela d'autant mieux que dans des expériences antérieures cette source ne s'était pas montrée plus régulière qu'un tube focus ordinaire. Mais, d'autre part, si l'on observe les nuages dès leur formation, on voit qu'ils s'évanouissent vivement, plus vivement que dans l'air. Il en résulte que l'aspect du nuage se modifie rapidement, et si à un moment donné il a une certaine intensité, très peu de temps après il n'y a plus rien.

Dans ces conditions, l'emploi de la méthode photographique devient plus difficile; on ne peut plus attendre le moment où les gouttes sont presque immobiles et les nuages plus homogènes.

Des photographies ont été prises dans les conditions suivantes : Durée d'exposition aux radiations 5 secondes, photographies prises 1 seconde après détente, $d = 1{,}36$, $n = 54$. A chaque expérience on changeait le sens du champ de façon à faire prédominer alternativement les ions négatifs et les ions positifs.

Dans la très grande majorité des cas, les nuages obtenus sont sensiblement les mêmes, *la dissymétrie n'apparaît pas.*

En résumé, dans le cas où l'ionisation est produite par le radium, la dissymétrie n'a été observée qu'avec le gaz $CO^2$, et encore plus difficilement que lorsque l'ionisation est produite par les rayons X.

Elle n'a été observée ni avec l'air, ni avec le méthane.

## CHAPITRE XIII.

### Étude de la condensation et de la dissymétrie dans une atmosphère de méthane.

1° *Le gaz n'est pas soumis à l'action d'une source ionisante.* — Pour des valeurs du degré de détente inférieures à $d = 1{,}31$, on n'observe pas de condensation; pour la valeur $d = 1{,}31$, on observe quelques gouttes, et pour $d = 1{,}318$, on obtient une pluie très nette.

On peut donc admettre que la condensation commence à se produire pour cette valeur du degré de détente, ce sera la limite inférieure.

L'appareil a été rempli à diverses reprises, et j'ai toujours obtenu sensiblement cette valeur.

Il est bon de remarquer à ce sujet que cette valeur $d = 1{,}318$ est supérieure à la valeur $d = 1{,}30$ trouvée comme limite inférieure du degré de détente pour le méthane dans le cas où le gaz est soumis à l'action ionisante de l'échantillon de matière radioactive. Nous avons déjà vu le même fait se produire pour l'air et le gaz $CO^2$.

Si l'on prend pour $\gamma$ (rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant) la valeur $\gamma = 1{,}316$ (Muller), on trouve que le degré de sursaturation correspondant est égal à 3,87, inférieur par conséquent à ce qui a été trouvé pour l'air et le gaz $CO^2$, savoir 4,4. Il est probable que le gaz en expérience n'est pas pur (le mode de remplissage de mon appareil ne me permet pas de m'en assurer) et que cette valeur de $\gamma$ ne peut lui convenir; mais comme à chaque remplissage j'ai trouvé sensiblement la même valeur, il en résulte que le gaz ainsi emprisonné a toujours sensiblement la même composition, et j'ai envisagé la question de la façon suivante :

J'ai calculé la valeur que devrait avoir $\gamma$ pour obtenir

le degré de sursaturation 4,4 avec le degré de détente 1,318, et j'ai trouvé 1,34. *Si c'est bien du degré de sursaturation que dépendent les phénomènes de condensation observés,* c'est 1,34 qui, dans l'avenir, devra être pris pour valeur de $\gamma$. En particulier, on pourra calculer à l'avance le degré de détente correspondant à la limite supérieure. On sait, en effet, que pour l'air et le gaz $CO^2$, le degré de sursaturation relatif à cette limite est sensiblement le même et voisin de 8,4; si l'on admet qu'il doit en être de même pour le méthane, en utilisant la valeur $\gamma = 1{,}34$, on pourra calculer le degré de détente correspondant. Pour la détente $d = 1{,}48$, la sursaturation est 8,6; la limite supérieure du degré de détente est donc voisine de cette valeur.

D'autre part, dans l'étude de la condensation produite dans une atmosphère de gaz $CO^2$, j'ai observé, quand le gaz n'est pas ionisé, un accroissement très net de l'intensité des nuages se produisant pour la valeur du degré de détente (et par suite de la sursaturation) qui correspond au cas où les ions négatifs cessent de se distinguer des ions positifs relativement à une plus grande facilité de condensation de la vapeur d'eau. On peut se demander s'il en est de même pour le méthane.

Dans l'air, la dissymétrie cesse de se produire pour une sursaturation $S = 7{,}2$; dans le gaz $CO^2$, elle cesse de se produire pour $S = 7{,}1$; c'est dire que le phénomène se produit dans ces deux gaz pour le même degré de sursaturation. Or, c'est aussi pour cette valeur que l'on observe un accroissement de condensation quand le gaz $CO^2$ n'est pas soumis à l'action des rayons X; si le résultat obtenu ne dépend que de la sursaturation, on devra observer un résultat analogue avec le méthane.

En calculant le degré de détente, on trouve qu'à la valeur $d = 1{,}44$ correspond un degré de sursaturation égal à $S = 6{,}86$, et qu'à la valeur $d = 1{,}45$ correspond

$S = 7{,}22$. C'est donc pour une valeur intermédiaire que le phénomène devrait se produire.

L'expérience a vérifié ces prévisions; sept photographies ont été prises successivement; elles correspondent aux degrés de détente suivants :

| Valeurs de $n$. | 60. | 61. | 62. | 63. | 64. | 65. | 66. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Degré de détente.. | 1,42 | 1,43 | 1,44 | 1,45 | 1,46 | 1,471 | 1,482 |

Les photographies ont été prises 3 secondes après la détente.

Les deux premières présentent peu de différence entre elles; *la troisième représente un nuage très nettement plus intense,* les nuages correspondant à la troisième, à la quatrième, à la cinquième sont à peu près de même intensité; la sixième représente un nuage un peu plus intense que les précédents; *quant à la septième, elle accuse une augmentation très grande de la condensation, elle représente non plus un nuage, mais un brouillard.*

Les accroissements de condensation prévus par le calcul : *a.* pour une valeur de $d$ comprise entre 1,44 et 1,45, plutôt au voisinage de 1,45; *b.* pour une valeur de $d$ voisine de 1,48, *se produisent effectivement pour* $d = 1{,}44$, *et pour* $d = 1{,}48$.

Il y a donc une très bonne concordance entre les résultats donnés par l'expérience et ceux prévus par le calcul en prenant pour $\gamma$ la valeur 1,34 dans le cas du gaz en expérience. Si l'on compare ces résultats avec ceux qui ont été obtenus à l'aide du gaz $CO^2$ non ionisé préalablement, on voit que les phénomènes de condensation observés présentent les mêmes particularités, et l'on est conduit à admettre que les variations remarquables de la condensation se produisent pour le même degré de sursaturation pour l'un et l'autre gaz.

Il reste à vérifier que $d = 1{,}48$ est aussi la limite supé-

rieure du degré de détente dans le cas où le gaz est ionisé par les rayons X et *surtout que la dissymétrie cesse de se produire pour un degré de détente voisin de* 1,44.

2° *Le gaz est soumis à l'action ionisante des rayons* X. — Le dispositif est celui qui a déjà été décrit dans le cas de l'air et du gaz $CO^2$.

La limite inférieure du degré de détente est la même qu'avec le radium : $d = 1{,}30$ ($n = 47$). Tout d abord, et pour des détentes un peu supérieures, les nuages sont plus stables que lorsque le gaz est ionisé par le radium et la dissymétrie s'observe très nettement.

Des expériences ont été faites en utilisant les détentes suivantes :

$d = 1{,}335$ ($n = 51$), $d = 1{,}344$ ($n = 52$), $d = 1{,}37$ ($n = 55$),

la durée d'exposition aux rayons était de 2 secondes et les photographies étaient prises 2 ou 3 secondes après la détente. La dissymétrie apparaît facilement.

Ce point étant acquis, j'ai opéré avec des détentes plus fortes de façon à me trouver au voisinage de $d = 1{,}44$ ($n = 62$) qui correspond à l'accroissement observé quand le gaz n'est soumis à aucune action ionisante. Mais alors les nuages sont plus difficiles à étudier, ils ont à nouveau une tendance à s'évanouir rapidement, comme cela a déjà été observé avec le radium. Dans le cas où l'ionisation est produite par les rayons X, c'est seulement quand la détente atteint $d = 1{,}42$ ($n = 60$) environ que l'on s'aperçoit plus particulièrement de la disparition rapide des nuages et que l'on commence à en être incommodé.

De plus, on obtient parfois, pour un même degré de détente, des condensations irrégulières, souvent très différentes. C'est ainsi, qu'à certaines séances, j'ai obtenu au début des nuages intenses, lents a disparaître, puis ensuite je retrouvais les nuages s'évanouissant vivement.

Ces complications rendent l'étude de la dissymétrie beaucoup plus difficile qu'avec le gaz $CO^2$.

De l'observation des photographies prises au degré de détente $d = 1{,}42$, il résulte que la dissymétrie peut encore être mise en évidence. Les photographies sont prises 2 secondes après la détente.

Je ne l'ai plus observée pour $d = 1{,}43$ ($n = 61$) et les valeurs supérieures, et les difficultés que je viens de signaler ne m'ont pas permis de faire l'étude correcte du phénomène de condensation pour de pareilles détentes.

Malgré cela, et en prenant la valeur $d = 1{,}43$ comme étant la détente limite à partir de laquelle la dissymétrie cesse d'exister entre les ions négatifs et les ions positifs, au point de vue de la condensation de la vapeur d'eau, on voit que ce nombre est très voisin de $d = 1{,}44$ qui est la valeur pour laquelle il s'est produit une augmentation sensible de la condensation quand le gaz n'est pas ionisé.

Comme je l'ai déjà dit pour le gaz $CO^2$, il est naturel d'admettre que la cause qui fait cesser la dissymétrie est aussi celle qui provoque l'augmentation brusque observée pour le même degré de détente quand le gaz n'est pas ionisé.

Malgré l'instabilité des nuages obtenus aux détentes élevées, j'ai pu néanmoins fixer la limite supérieure du degré de détente.

J'avais observé plus particulièrement dans une série d'expériences que les nuages obtenus aux détentes élevées disparaissaient très rapidement et que, 3 secondes après leur formation, des nuages, cependant intenses au début, ne laissaient que peu de traces sur la plaque photographique. J'ai alors pensé qu'en atteignant la détente critique 1,48 pour laquelle les molécules du gaz entrent à leur tour en action, le nuage se comporterait autrement, car sans ionisation préalable je n'avais pas observé l'éva-

nouissement rapide des gouttes à ce haut degré de détente.

L'expérience a justifié cette manière de voir; pour des détentes allant de 1,44 à 1,471, les photographies produisent bien l'impression que l'on a affaire à un nuage qui disparaît; elles contiennent peu de gouttes, la plupart peu nettes, rassemblées dans une petite portion du champ et dont le nombre ne paraît pas être influencé sensiblement par le degré de détente. Quand on passe au degré de détente $d = 1{,}482$, l'aspect change complètement, on a la photographie d'un nuage intense, presque un brouillard, les gouttes sont plus nettes et se répartissent sur l'ensemble de la plaque.

Ceci indique bien que même quand le gaz est ionisé, il se produit pour ce degré de détente 1,48 un accroissement de condensation.

La méthode photographique n'est pas nécessaire pour observer ce fait, et je l'ai vérifié par la suite plusieurs fois simplement par observation directe.

La concordance avec ce qui a été obtenu sans ionisation préalable et aussi avec les prévisions du calcul est donc très bonne. On obtient avec le méthane en expérience des phénomènes analogues à ceux qui ont été observés avec le gaz $CO^2$, mais l'étude en est plus difficile, surtout quand le gaz est soumis préalablement à l'ionisation.

Au cours de ces expériences, j'avais pensé que les inégalités observées, surtout pour des détentes supérieures à $d = 1{,}42$, provenaient peut-être du tube focus qui avait déjà servi antérieurement. J'ai employé ensuite un tube fraîchement vidé, et je n'ai pas obtenu de meilleurs résultats. Avec ce nouveau tube, j'ai vérifié que la dissymétrie se produisait bien pour les détentes voisines de la limite inférieure et j'ai trouvé les mêmes difficultés pour les détentes supérieures.

Ces difficultés paraissent donc tenir à la nature du gaz.

*Conclusions.* — Les résultats obtenus dans l'ensemble de ce travail peuvent se grouper de la façon suivante :

1° Vérification de faits antérieurement observés relativement à la condensation de la vapeur d eau par détente;

2° Faits nouveaux se rapportant à l'étude de la condensation ou à la dissymétrie des ions négatifs et positifs et n'ayant pas encore été signalés au moment de mes expériences; ou bien méthode nouvelle non encore employée;

3° Phénomènes accessoires dont l'étude se trouve liée à celle de la condensation.

## I.

Le gaz (air) n'étant pas ionisé préalablement, j'ai vérifié sensiblement, par observation directe, les résultats indiqués par M. Wilson relativement à la limite inférieure et à la limite supérieure du degré de détente, en faisant toutefois observer qu'il y a à ce sujet une certaine incertitude.

En ce qui concerne la limite inférieure, l'incertitude tient à ce qu'au commencement, il y a peu de gouttes; l'apparition de quelques rares gouttes ne peut pas être considérée comme indiquant le début du phénomène de condensation qui est ainsi laissé un peu à l'appréciation personnelle de l'opérateur.

Relativement à la limite supérieure, l'incertitude tient à ce que les nuages sont intenses, les centres résiduels disparaissent alors difficilement, et l'intervalle de temps qui sépare deux expériences consécutives étant assez grand, la comparaison s'effectue moins facilement.

Pour les détentes variant de 1,38 à 1,43, les nuages m'ont paru dépendre encore un peu du degré de détente; j'ai rappelé que dans ce même intervalle (1,38 à 1,44), M. Wilson avait observé de belles colorations.

Dans ses premières expériences, le physicien anglais avait déclaré qu'un faible champ était sans action sur les phénomènes de condensation qui prennent naissance à des degrés de détente un peu supérieurs à la limite inférieure; dans la suite, il a reconnu que l'action d'un tel champ empêchait la condensation de se produire.

J'ai également observé cette action.

Par observation directe, j'ai déterminé aussi la limite inférieure du degré de détente dans le cas où le gaz en expérience est le gaz $CO^2$; la valeur trouvée 1,34 est un peu plus faible que celle donnée par M. Wilson (1,36).

## II.

Après avoir constaté l'existence des centres résiduels invisibles, qui durent plus ou moins longtemps après l'évanouissement des gouttes visibles, j'ai signalé la perturbation exercée par ces centres dans des expériences ultérieures, et d'après laquelle l'ordre adopté pour les effectuer n'est pas indifférent. D'où la nécessité de les faire disparaître avant de passer à un autre essai.

En cherchant à les éliminer par compression, j'ai été conduit à signaler qu'une compression brusque d'un gaz saturé de vapeur d'eau, et complètement dépourvu de germes capables de produire la condensation par détente faible, donne naissance à des centres invisibles qui sont capables de produire la condensation de la vapeur d'eau très légèrement sursaturante, c'est-à-dire à des centres qui se comportent comme de gros ions ou des poussières. D'où l'impossibilité d'utiliser la compression brusque pour faire disparaître les centres résiduels.

En cherchant à les éliminer à l'aide d'un champ électrique intense, j'ai été conduit à observer l'action d'une étincelle extrêmement petite, éclatant dans un gaz.

Si le fait que cette étincelle donne naissance à de gros

ions n'est pas nouveau, il n'en est probablement pas de même de la méthode employée pour le mettre en évidence.

C'est en utilisant leur faculté de condensation de la vapeur d'eau que j'ai pu mettre en évidence l'existence de ces ions et leur faible mobilité.

Après avoir vérifié que l'action d'un faible champ empêche la condensation de se produire à des degrés de détente voisins de la limte inférieure, j'ai signalé que cette action persiste partiellement, alors même que le champ est supprimé, et qu'il faut un certain temps pour retrouver les condensations primitives.

Ceci montre que les ions qui donnent naissance à ces faibles condensations et qui ont été éliminés par le champ ne se reforment pas instantanément dès que le champ est supprimé.

J'ai utilisé une méthode photographique permettant de fixer les apparences observées et de les comparer aisément. Grâce à l'emploi de cette méthode, j'ai été le premier à obtenir des photographies des phénomènes de condensation et, en particulier, de la dissymétrie présentée par les ions positifs et négatifs relativement à leur faculté de condensation de la vapeur d'eau. Cette dissymétrie a été mise en évidence dans le cas de l'air en employant successivement comme source ionisante un tube de Crookes et un tube focus.

Dans une étude d'ensemble sur la détermination des limites inférieures et supérieures du degré de détente, M. Wilson a utilisé $CO^2$ en même temps que d'autres gaz, mais l'étude systématique de la condensation aux divers degrés de détente n'a pas été faite.

Je l'ai réalisée en faisant appel à la méthode photographique; j'ai fixé par la photographie les apparences observées, et j'ai déterminé ainsi facilement la limite supérieure du degré de détente : 1,52 au lieu de 1,53, nombre donné par M. Wilson. J'ai observé également un accrois-

sement sensible de la condensation pour la valeur du degré de détente $d = 1{,}477$.

Au cours de ces expériences, j'ai montré aussi que la présence d'une petite quantité d'air abaissait la limite inférieure du degré de détente et qu'il importait d'éliminer toute trace d'air. Cette remarque est intéressante, étant donné le mode de remplissage de mon appareil; peut-être convient-il de la retenir pour expliquer pourquoi les valeurs limites de la détente, obtenues dans mes expériences, sont un peu plus faibles que celles de M. Wilson.

L'étude de la dissymétrie n'a pas été effectuée antérieurement avec le gaz $CO^2$; je l'ai réalisée, et, pour de faibles détentes, par observation directe, elle apparaît déjà nettement, beaucoup mieux qu'avec l'air. J'ai fait également appel à la méthode photographique; j'ai signalé que la dissymétrie cesse de se produire pour une valeur du degré de détente égale à $d = 1{,}476$ et que la limite supérieure du degré de détente est toujours 1,52.

J'ai appelé l'attention sur ce fait que, pour le degré de détente 1,477, on observe un accroissement de condensation quand le gaz n'est pas ionisé, alors que, pour cette même valeur, la dissymétrie cesse d'exister dans le cas où le gaz est préalablement ionisé. Il est probable que cette coïncidence n'est pas fortuite, et que ces deux effets ont une même origine.

J'ai signalé, en outre, une anomalie singulière : sans champ, le nuage n'est pas plus intense que lorsque les ions négatifs sont en excès, et cela pour tous les degrés de détente. Elle cesse de se produire quand la différence de potentiel entre les plateaux est de 20 volts environ.

Quand la source ionisante est le radium, cette anomalie n'existe plus; la dissymétrie s'observe encore avec $CO^2$, mais plus difficilement. Avec l'air et le méthane, la dissymétrie n'a pas pu être mise en évidence; en par-

ticulier, quand on emploie ce dernier gaz, les nuages disparaissent plus rapidement.

Si, de la valeur du degré de détente, on passe à la valeur du degré de sursaturation, le calcul montre que la condensation commence à se produire pour la même valeur 4,4 pour l'air et le gaz $CO^2$, et que les molécules gazeuses servent à leur tour de germes pour la même valeur 8,4 du degré de sursaturation.

Ce résultat a déjà été indiqué par M. Wilson, mais j'ai en outre vérifié que la dissymétrie cesse de se produire dans l'air et $CO^2$ pour le même degré de sursaturation, savoir : 7,2 en utilisant la valeur du degré de détente trouvée par M. Wilson pour l'air; 7,1 en utilisant la valeur que j'ai trouvée pour le gaz $CO^2$.

Les phénomènes de condensation observés paraissent donc dépendre uniquement du degré de sursaturation.

C'est cette idée qui m'a dirigé dans l'étude de la condensation à l'aide du méthane, et j'en ai eu à nouveau la confirmation.

Si 4,4 est le degré de sursaturation correspondant à la limite inférieure du degré de détente, on peut calculer les valeurs de la détente pour lesquelles on devrait observer un accroissement de condensation correspondant à la sursaturation 7,1 et la limite supérieure relative à la sursaturation 8,4 (le gaz n'étant pas ionisé).

La concordance entre les valeurs ainsi calculées et les valeurs données par l'expérience est très satisfaisante

Quand le gaz est ionisé, les expériences sont plus difficiles, mais néanmoins les résultats obtenus sont encore satisfaisants.

Avec les trois gaz étudiés, air, $CO^2$, méthane, j'ai toujours observé que la limite inférieure du degré de détente est un peu plus basse quand le gaz est ionisé que sans ionisation préalable.

## III.

En étudiant les phénomènes de condensation, j'ai observé des radiations parasites, émanant du tube focus, et qui ne paraissaient pas être beaucoup influencées par des écrans de plomb épais interposés entre la source et la chambre. L'étude de ces rayons a montré qu'ils étaient sans action sur l'écran fluorescent et la plaque photographique, et qu'ils étaient peu sensibles à l'action de la distance, c'est-à-dire qu'ils s'affaiblissaient peu quand la distance augmentait. Ces rayons étaient également émis par la partie du tube qui est en arrière de l'anticathode, mais en quantité moindre.

Il y a donc beaucoup d'analogie avec ceux qui ont été signalés par M. Barus, rayons qui ont été appelés par lui *très pénétrants*, et qui seraient émis en même temps que les rayons X.

Un tube focus a plus particulièrement émis de tels rayons, alors que d'autres en ont émis relativement peu.

Après avoir étudié les rayons X émis par les diverses parties du tube, j'ai fait l'étude comparée de la puissance d'ionisation de ces rayons et des rayons parasites en utilisant les phénomènes de condensation. L'expérience a montré que si toute la masse de gaz en expérience est soumise à l'action des rayons, l'ionisation produite par les rayons X est bien supérieure à celle provenant des rayons parasites.

Or, lorsqu'on étudie la dissymétrie, seule une tranche mince du gaz est soumise à l'action des rayons X, alors que toute la masse est ionisée par les rayons parasites; malgré cela, étant donné que les rayons sont peu sensibles à l'action de la distance et que les rayons X le sont au contraire beaucoup, on pourra toujours faire prédominer ces derniers en approchant suffisamment le tube

focus et en utilisant, pour plus de précautions, un écran épais présentant une fente horizontale étroite. C'est ce qui a été fait.

Au cours de ces essais, j'ai eu l'impression que l'emploi des phénomènes de condensation constitue une méthode très sensible pour déceler la présence d'ions dans un gaz, ou, ce qui revient au même, pour déceler la présence de radiations ionisantes.

Enfin, j'ai vérifié, en fixant le trajet du faisceau ionisant sur une plaque photographique, que ce faisceau était mince, linéaire, c'est-à-dire présentait les qualités requises pour ce genre d'expériences.

Au cours de ce travail, j'ai été amené à apporter quelques modifications à l'appareil qui ne m'avait pas donné d'abord toute satisfaction au point de vue de l'étanchéité, et aussi de la fixité du plateau métallique contenu dans la chambre de condensation.

Postérieurement à mes essais, M. C.-T.-R. Wilson [1] a utilisé, lui aussi, une méthode photographique différente de la mienne, dans le but de rendre visibles les chemins de particules ionisantes dans les gaz.

Ce travail a été fait au laboratoire du collège de Saint-Dié; commencé en 1908, il a été terminé en 1913; mais pendant les deux premières années, il a été interrompu pendant de longs mois, par suite de deuils cruels.

Je ne saurais exprimer trop vivement ma reconnaissance à M. Rothé, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, qui m'a suggéré l'idée de ces recherches et m'a donné les moyens de réaliser mes expériences et de les mener à bonne fin, en mettant à ma disposition les ressources de son laboratoire.

L'intérêt qu'il n'a cessé de témoigner à mon travail

---

[1] *Radium*, 1913.

a été pour moi un précieux encouragement, et j'ai tiré le plus grand profit de ses conseils et des idées échangées à ce sujet.

*Vu et approuvé :*
Nancy, le 9 mai 1913.
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
G. FLOQUET.

*Vu et permis d'imprimer :*
Nancy, le 10 mai 1913.
Le Recteur de l'Académie de Nancy,
Ch. ADAM,
Correspondant de l'Institut.

# TABLE DES MATIÈRES.


| | | Pages. |
|---|---|---|
| Introduction | | 1 |
| Chapitre I. | — Expériences de condensation | 2 |
| » II. | — Hypothèse des ions | 12 |
| » III. | — Condensation. Expériences de M. C.-T.-R. Wilson | 23 |
| » IV. | — Reprise des expériences de M. Wilson | 37 |
| » V. | — Emploi d'une méthode photographique | 73 |
| » VI. | — Expériences relatives à la dissymétrie | 75 |
| » VII. | — Étude de la dissymétrie avec un tube de Crookes | 86 |
| » VIII. | — Étude des radiations émises par les diverses parties d'un tube focus bianodique | 92 |
| » IX. | — Étude photographique de la dissymétrie à l'aide d'un tube focus bianodique | 99 |
| » X. | — Phénomènes de condensation produits par détente dans une atmosphère de $CO^2$ | 103 |
| » XI. | — Étude parallèle de la dissymétrie des ions positifs et négatifs dans une atmosphère de $CO^2$ | 114 |
| » XII. | — Recherche de la dissymétrie avec différents gaz ionisés par le radium | 124 |
| » XIII. | — Étude de la condensation et de la dissymétrie dans une atmosphère de méthane : | |
| | 1° Sans ionisation préalable | 131 |
| | 2° Avec ionisation préalable | 134 |

# SECONDE THÈSE.

## PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Ozone.

*Vu et approuvé :*
Nancy, le 9 mai 1913.
Le Doyen de la Faculté des Sciences
G. FLOQUET.

*Vu et permis d'imprimer :*
Nancy, le 10 mai 1913.
Le Recteur de l'Académie de Nancy,
Ch. ADAM,
Correspondant de l'Institut.

52323 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.